



**Filipe José Oliveira da  
Graça Neves**

**Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque  
habitacional da ilha do Faial**



**Filipe José Oliveira da  
Graça Neves**

**Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque  
habitacional da ilha do Faial**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático, e do Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Auxiliar, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

**Aos meus pais, pela vida  
À Ana pelo rumo**

## **agradecimentos**

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os que contribuíram para a realização desta tese.

Ao Prof. Aníbal Costa e ao Prof. Humberto Varum pela orientação, pelo empenho e conhecimento, os quais foram essenciais para a realização deste trabalho.

Um grande agradecimento ao Prof. Romeu Vicente, por todo o tempo dispensado, o apoio e conhecimento decisivo para esta tese.

Ao Prof. Carlos Sousa Oliveira pela honra de trabalhar e por transmitir uma extrema motivação e gosto pela engenharia sísmica.

Gostaria de agradecer à Mónica Ferreira e ao Xavier Romão por toda a ajuda e pela disponibilidade demonstrada.

Aos meus colegas e amigos de trabalho: Valter Lopes, Tiago Ilharco, Bruno Quelhas, André Monteiro, Diogo Coutinho, João Milheiro, Rui Ribeiro, por tornarem todos os minutos, bons momentos.

Obrigado à Esmeralda Paupério e João Paulo pelo exemplo de profissionalismo e cooperação.

Aos funcionários da Secretaria Regional da Habitação e Equipamento pela ajuda e afectividade demonstrada.

Um muito obrigado aos meus pais, por sempre estarem ao meu lado e por apoiarem em todos os momentos.

A Ana Calejo por tudo o que faz sentido na vida.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim**  
Professor associado da Universidade de Aveiro

**Doutor Alfredo Peres de Noronha Campos Costa**  
Investigador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa**  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Humberto Salazar Amorim Varum**  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

## **palavras-chave**

parque habitacional do Faial, risco sísmico, vulnerabilidade sísmica, cenários de dano.

## **resumo**

A avaliação do risco sísmico relaciona-se com casualidade, a vulnerabilidade e a exposição. A vulnerabilidade apresenta uma elevada importância ao nível da engenharia sísmica, pois é o factor onde é possível intervir, de forma a reduzir os efeitos de eventos sísmicos, nível de dano, perdas económicas e de vidas. Por outro lado, o desenvolvimento de estudos de vulnerabilidade permitem fornecer elementos para o planeamento e gestão do risco de áreas susceptíveis. Assim sendo, o principal objectivo deste trabalho, foi analisar a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da ilha do Faial. Para tal utilizou-se como base de estudo o sismo ocorrido a 9 de Julho de 1998 no Grupo Central dos Açores que afectou grandemente as ilhas do Faial e Pico. Antes de ser possível uma análise da vulnerabilidade, é essencial caracterizar o objecto de estudo, como tal foi inicialmente elaborada uma base de dados para a caracterização do parque habitacional da ilha do Faial. Verificou-se que o parque habitacional da ilha do Faial é caracterizado por construções tradicionais de alvenaria de pedra, com pavimentos e coberturas em madeira. De forma a perceber os efeitos do sismo de 1998 nas construções tradicionais, foi elaborada uma classificação original do nível de dano e uma posterior análise dos danos observados. Para a análise da vulnerabilidade foi usada uma metodologia de nível II (second level) usada em estudos anteriores. Esta metodologia demonstra elevada aplicabilidade ao nível de grandes regiões ou áreas sem abdicar de um elevado nível de rigor. Neste trabalho foram implementadas alterações à metodologia, de forma a avaliar o efeito da componente vertical da acção sísmica, que usualmente se verifica nos eventos sísmicos no arquipélago dos Açores. No parque habitacional da ilha do Faial, verificou-se que o índice de vulnerabilidade é elevado e apresenta uma propensão para o dano, para eventos sísmicos de intensidades moderadamente elevadas.

Os resultados da análise da vulnerabilidade juntamente com os elementos da base de dados do parque habitacional foram inseridos numa ferramenta SIG (Sistema de Informação Geográfica) permitindo a representação espacial e elaboração de cenários de danos, para o planeamento e gestão do risco sísmico.

**keywords**

buildings of Faial Island, seismic risk, seismic vulnerability, damage scenarios.

**abstract**

The seismic risk assessment is related with causality, vulnerability and exposure. Vulnerability is of great importance for seismic engineering, since is the only factor where is possible to intervene in order to reduce the effects of seismic events, the level of damage, economic losses and of lives. Furthermore, the development of vulnerability studies can provide data for risk planning and management of areas with seismic risk. Therefore, the main purpose of this work was to analyse the seismic vulnerability of the house stock of Faial island. With that purpose was studied the Azores earthquake of 9 July of 1998 which greatly affected the Central group, mainly Faial and Pico islands. Before the vulnerability analysis, was created a database of house stock of Faial island since it is essential to characterize the object of study. It was found that the housing stock of the island of Faial is characterized by buildings of traditional stone masonry with wooden floors and roofs. In order to understand the seismic effects of 1998 in traditional constructions it was created a original classification of the level of damage and also a further analysis of the observed damage. For the vulnerability analysis it was used a second level methodology, used in previous studies. This approach is very useful and has high applicability for large regions or areas. However, in this work there are several modifications to this method, in order to evaluate the effects of the vertical component of the seismic action, which usually occur in seismic events in Azores. We were able to determine that the index of vulnerability is high in Faial house stock and presents a propensity for damage, for seismic events with high intensities. The results of the vulnerability analyses together with the housing stock database were also analyzed with a GIS tool (Geographic Information System), allowing the spatial representation and damage scenarios for the planning and management of seismic risk.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2	SISMOS NOS AÇORES	2
1.3	OBJECTIVOS	4
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
<b>2</b>	<b>LEVANTAMENTO DE DADOS, INVENTÁRIO</b>	<b>7</b>
2.1	RECOLHA DE INFORMAÇÃO	7
2.2	FERRAMENTA SIG	8
2.3	PROBLEMAS COM BASES DE DADOS	9
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL</b>	<b>11</b>
3.1	INTRODUÇÃO	11
3.2	TIPO CONSTRUTIVO	13
3.2.1	CONSTRUÇÃO TRADICIONAL (CT)	13
3.2.2	CONSTRUÇÃO TRADICIONAL ALTERADA (CTA)	14
3.2.3	CONSTRUÇÃO CORRENTE (CC)	14
3.2.4	CONSTRUÇÃO MISTA 1 (CM1)	14
3.2.5	CONSTRUÇÃO MISTA 2 (CM2) CT+CC	15
3.2.6	CONSTRUÇÃO MISTA 3 (CM3)	15
3.3	TRATAMENTO DOS RESULTADOS	16
3.4	EXISTÊNCIA OU NÃO DE CAVE	18
3.5	GEOMETRIA EM PLANTA DO EDIFÍCIO E NÚMERO DE PISOS	18
3.6	EXISTÊNCIA DE EDIFÍCIOS CONTÍGUOS	19
3.7	TIPO DE ESTRUTURA DA COBERTURA	20
3.8	TIPO DE PAVIMENTO	23
3.9	TIPO DE PAREDE INTERIOR	25
3.10	TIPO DE PAREDE EXTERIOR	26
3.11	DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS	27
<b>4</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS DANOS OBSERVADOS</b>	<b>31</b>
4.1	INTRODUÇÃO	31
4.2	CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS EXTERIORES	31
4.2.1	FENDILHAÇÃO LIGEIRA	33
4.2.2	FENDILHAÇÃO ACENTUADA	35
4.2.3	FRACTURA	36
4.2.4	COLAPSO	38



4.2.5	RUÍNA	42
4.3	CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS INTERIORES	43
4.3.1	FENDILHAÇÃO LIGEIRA	44
4.3.2	FENDILHAÇÃO ACENTUADA	45
4.3.3	FRACTURAS	47
4.3.4	COLAPSO	48
4.3.5	RUÍNA	50
4.4	ANÁLISE DOS DANOS OBSERVADOS	51
4.4.1	DANOS EXTERIORES	52
4.4.2	DANOS INTERIORES	54
4.5	CONVERSÃO PARA EMS-98	56
4.6	DISCUSSÃO DO LEVANTAMENTO E DA CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA	58
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO</b>	<b>59</b>
5.1	CONCEITO DO RISCO SÍSMICO	59
5.2	CASUALIDADE	60
5.3	EXPOSIÇÃO	63
5.4	VULNERABILIDADE	63
5.5	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA	69
5.6	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA	71
5.7	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE EM EDIFÍCIOS – IMPORTÂNCIA DA COMPONENTE VERTICAL DA ACÇÃO SÍSMICA	79
5.8	AVALIAÇÃO COMPLEMENTAR DA VULNERABILIDADE	83
5.9	ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
5.10	NÍVEL DE CONFIANÇA	90
5.11	ESTIMATIVA DE DANOS	92
5.12	CURVAS DE FRAGILIDADE	95
5.13	AVALIAÇÃO DE PERDAS	96
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>101</b>
6.1	PARQUE HABITACIONAL	101
6.2	DANOS OBSERVADOS	102
6.3	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE	103
6.4	TRABALHOS FUTUROS	104
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

### 1 INTRODUÇÃO

FIGURA 1.1 – EPICENTRO DOS EVENTOS SÍSMICOS, IMAGEM RETIRADA E ADAPTADA DE WWW.NASA.GOV	2
---	---

### 2 LEVANTAMENTO DE DADOS, INVENTÁRIO

FIGURA 2.1 ASPECTO GRÁFICO DO PROGRAMA ARCMAP 9.2	9
---	---

### 3 CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL

FIGURA 3.1– FREGUESIAS DA ILHA DO FAIAL, REPRESENTADO COM LINHAS DE ALTIMETRIA	12
FIGURA 3.2– REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DO SISTEMA CONSTRUTIVO, ATRAVÉS DO SIG	14
FIGURA 3.3 – TIPO DE CONSTRUÇÃO POR FREGUESIA NO FAIAL (UNIVERSO 2305)	17
FIGURA 3.4 – PERCENTAGEM DE TIPOS DE CONSTRUÇÃO NO FAIAL (UNIVERSO 2305)	19
FIGURA 3.5 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO TIPO DE CAVE	18
FIGURA 3.6 – TIPO DE CAVE POR FREGUESIA	18
FIGURA 3.7 – GEOMETRIA DOS EDIFÍCIOS POR FREGUESIAS (UNIVERSO DA AMOSTRA 2258)	19
FIGURA 3.8 – NÚMERO DE PISOS POR FREGUESIA (UNIVERSO DA AMOSTRA 2300)	19
FIGURA 3.9 – EXISTÊNCIA DE EDIFÍCIOS CONTÍGUOS POR FREGUESIA (UNIVERSO DA AMOSTRA 2214)	20
FIGURA 3.10 – COBERTURA TÍPICA DA ILHA DO FAIAL	21
FIGURA 3.11 – PORMENOR DA COBERTURA TÍPICA DA ILHA DO FAIAL	21
FIGURA 3.12 – TELHADO À FRANCESA	21
FIGURA 3.13 – TELHADO À CAVALO	22
FIGURA 3.14 – TELHADO EM TESOURA	22
FIGURA 3.15 – TIPO DE ASNA MAIS FREQUENTE, RETIRADO DE [LAMAS, 2003]	23
FIGURA 3.16 – TIPOS DE ESTRUTURAS DAS COBERTURAS (UNIVERSO DA AMOSTRA 216)	23
FIGURA 3.17 – LIGAÇÃO DAS VIGAS À ALVENARIA DE PEDRA, RETIRADO DE [LAMAS, 2003]	24
FIGURA 3.18 – TIPOS DE PAVIMENTO (UNIVERSO DA AMOSTRA 2317)	24
FIGURA 3.19 – ESTRUTURA DA COBERTURA APOIADA EM DIVISÓRIAS INTERIORES DE TABIQUE DE MADEIRA	25
FIGURA 3.20 – ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DO TABIQUE, RETIRADO DE [LAMAS, 2003]	25
FIGURA 3.21 – TIPOS DE PAREDES INTERIORES (UNIVERSO DA AMOSTRA 513)	25
FIGURA 3.22 – TIPOS DE SECÇÃO TRANSVERSAL DAS ALVENARIAS DE PEDRA, CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO [GNDT-SSN, 1994] (A) UM PANO (B) DOIS PANOS SEM LIGAÇÃO. (C) DOIS PANOS COM LIGAÇÃO. (D) TRÊS PANOS COM NÚCLEO DE FRACA QUALIDADE.	27
FIGURA 3.23 – TIPOS DE PAREDE EXTERIOR (UNIVERSO DA AMOSTRA 157)	27

<b>4</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS DANOS OBSERVADOS</b>	
FIGURA 4.1 – DISTRIBUIÇÃO DO TIPO DE DANO NO UNIVERSO		32
FIGURA 4.2 – ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE DANOS EM CONSTRUÇÕES		33
FIGURA 4.3 – D1EF, FENDILHAÇÃO LIGEIRA NA EMPENA E FACHADA		34
FIGURA 4.4 – D1F, FENDILHAÇÃO LIGEIRA NA FACHADA		34
FIGURA 4.5 – D1E, FENDILHAÇÃO LIGEIRA NA EMPENA		34
FIGURA 4.6 – FENDILHAÇÕES LIGEIRAS POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 566/2294)		34
FIGURA 4.7 – D2E, FENDILHAÇÃO ACENTUADA NA EMPENA		35
FIGURA 4.8 – D2EF, FENDILHAÇÃO ACENTUADA NA EMPENA E FACHADA		35
FIGURA 4.9 – D2F, FENDILHAÇÃO ACENTUADA NA EMPENA		35
FIGURA 4.10 – FENDILHAÇÃO ACENTUADA POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 482/2294)		36
FIGURA 4.11 – D3EF, FRACTURA NA EMPENA E FACHADA		37
FIGURA 4.12 - D3E, FRACTURA NA EMPENA		37
FIGURA 4.13 - D3F, FRACTURA NA FACHADA		37
FIGURA 4.14 - D3K, FRACTURA NO CANTO		37
FIGURA 4.15 – FRACTURAS POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 819/2294)		37
FIGURA 4.16 – D4C1, COLAPSO DA COBERTURA		38
FIGURA 4.17 – D4C2, COLAPSO DA COBERTURA		38
FIGURA 4.18 – D4E1, COLAPSO DA EMPENA		39
FIGURA 4.19 – D4E2, COLAPSO DA EMPENA		39
FIGURA 4.20 – D4E3, COLAPSO DA EMPENA		39
FIGURA 4.21 – D4E4, COLAPSO DA EMPENA		39
FIGURA 4.22 – COLAPSO DA COBERTURA POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 37/2294)		39
FIGURA 4.23 – COLAPSO NAS EMPENAS POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 203/2294)		39
FIGURA 4.24 – D4F1, COLAPSO DA FACHADA		40
FIGURA 4.25 – D4F2, COLAPSO DA FACHADA		40
FIGURA 4.26 – D4F3, COLAPSO DA FACHADA		40
FIGURA 4.27 – D4F4, COLAPSO DA FACHADA		40
FIGURA 4.28 – D4K1, COLAPSO DO CANTO		41
FIGURA 4.29 – D4K2, COLAPSO DO CANTO		41
FIGURA 4.30 –, D4K3, COLAPSO DO CANTO		41
FIGURA 4.31 – D4K4, COLAPSO DO CANTO		41
FIGURA 4.32 – COLAPSO NAS FACHADAS POR FREGUESIA, (UNIVERSO DA AMOSTRA 89/2294)		41
FIGURA 4.33 – COLAPSO NOS CANTOS POR FREGUESIA, (UNIVERSO DA AMOSTRA 43/2294)		41
FIGURA 4.34 – D5C, RUÍNA NA COBERTURA		42

FIGURA 4.35 – D5E, RUÍNA NA EMPENA	42
FIGURA 4.36 – D5F, RUÍNA NA FACHADA	42
FIGURA 4.37 – RUÍNAS POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 254/2294)	43
FIGURA 4.38 – FENDILHAÇÃO LIGEIRA PAREDES	44
FIGURA 4.39 – FENDILHAÇÃO LIGEIRA D1T	44
FIGURA 4.40 – FENDILHAÇÃO LIGEIRA POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 489/2293)	45
FIGURA 4.41 – FENDILHAÇÃO ACENTUADA PAREDES, D2P	46
FIGURA 4.42 – FENDILHAÇÃO ACENTUADA TECTOS, D2T	46
FIGURA 4.43 – FENDILHAÇÃO ACENTUADA POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 525/2293)	46
FIGURA 4.44 – FRACTURA DAS PAREDES, D3P	47
FIGURA 4.45 – FRACTURA DO PAVIMENTO, D3PV	47
FIGURA 4.46 – FRACTURAS INTERIORES POR FREGUESIAS, D3T	47
FIGURA 4.47 – FRACTURAS INTERIORES POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 704/2293)	48
FIGURA 4.48 – COLAPSO DOS TECTOS, D4T	49
FIGURA 4.49 – COLAPSO DAS PAREDES, D4P	49
FIGURA 4.50 – COLAPSO INTERIOR POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 289/2293)	49
FIGURA 4.51 – EDIFÍCIO EM RUÍNA (PAREDES INTERIORES)	50
FIGURA 4.52 – EDIFÍCIO EM RUÍNA (TECTOS)	50
FIGURA 4.53 – RUÍNAS INTERIORES POR FREGUESIAS, (UNIVERSO DA AMOSTRA 246/2293)	51
FIGURA 4.54 – RELAÇÃO DOS DANOS COM O TIPO CONSTRUTIVO, NA ILHA DO FAIAL,	52
FIGURA 4.55 – RELAÇÃO DOS DANOS (D1 E D2) COM O TIPO CONSTRUTIVO, (UNIVERSO DA AMOSTRA 990/2246)	53
FIGURA 4.56 – RELAÇÃO DOS DANOS (D3) COM O TIPO CONSTRUTIVO, (UNIVERSO DA AMOSTRA 623/2246)	53
FIGURA 4.57 – RELAÇÃO DOS DANOS (D4) COM O TIPO DE SISTEMA CONSTRUTIVO, (UNIVERSO DA AMOSTRA 277/2246)	53
FIGURA 4.58 – RELAÇÃO DOS DANOS (D5) COM O TIPO DE SISTEMA CONSTRUTIVO, (UNIVERSO DA AMOSTRA 256/2246)	53
FIGURA 4.59 – RELAÇÃO DOS DANOS LOCALIZADOS COM O TIPO DE SISTEMA CONSTRUTIVO,	54
FIGURA 4.60 – RELAÇÃO DO TIPO DE CONSTRUÇÃO COM OS DANOS INTERIORES, (UNIVERSO DA AMOSTRA 2221)	55
FIGURA 4.61 – RELAÇÃO DO TIPO CONSTRUTIVO COM OS DANOS INTERIORES LOCALIZADOS,	55
FIGURA 4.62 – COMPARAÇÃO DOS REGISTOS FOTOGRÁFICOS, DANOS OBSERVADOS/EMS-	57

## **5 AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO**

FIGURA 5.1 – ESQUEMA DOS ASPECTOS A CONSIDERAR NA AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO.	60
FIGURA 5.2 – CARTA DE SOLOS DA ILHA DO FAIAL, [NUNES ET AL., 2001]	61
FIGURA 5.3- NÍVEIS DE VULNERABILIDADE	63
FIGURA 5.4- DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE VULNERABILIDADE SEGUNDO A ESCALA EMS-98, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	65
FIGURA 5.5- CLASSIFICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DAS METODOLOGIAS SEGUNDO [CORSANEGO ET AL., 1990]	66
FIGURA 5.6 – CONFRONTO DAS CURVAS DE VULNERABILIDADE DAS METODOLOGIAS MACROSSÍSMICA E GNDT II, [VICENTE, 2008]	70
FIGURA 5.7 – ESQUEMAS DE CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAÇÕES ENTRE ELEMENTOS ESTRUTURAIS, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	72
FIGURA 5.8 – CARACTERIZAÇÃO DO TIPO DE LIGAÇÃO NOS CUNHAIS, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	73
FIGURA 5.9 – CLASSES PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ALVENARIAS, ADAPTADO DE [VICENTE, 2008]	73
FIGURA 5.10 – ESQUEMA DE COLAPSO PARA FORA DO PLANO, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	74
FIGURA 5.11 – ESQUEMA DE DEFORMAÇÃO POR ACÇÕES LATERAIS, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	75
FIGURA 5.12 – IRREGULARIDADES EM PLANTA	75
FIGURA 5.13 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS CLASSES DE VULNERABILIDADE DO PARÂMETRO 9	76
FIGURA 5.14 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS CLASSES DE VULNERABILIDADE DO PARÂMETRO 10	76
FIGURA 5.15 – TIPOS DE PAVIMENTOS E SUA RIGIDEZ, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	77
FIGURA 5.16 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE COBERTURA, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	78
FIGURA 5.17 – IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE DANOS ESTRUTURAIS, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	78
FIGURA 5.18 – TIPOS DE ELEMENTOS NÃO ESTRUTURAIS, RETIRADO DE [VICENTE, 2008]	79
FIGURA 5.19 – INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE (KV) NA FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA CONVENCIONAL	82
FIGURA 5.20 – RELAÇÃO DE ALGUNS DADOS OBTIDOS DOS PARÂMETROS	86
FIGURA 5.21 – DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DOS PARÂMETROS USADOS NO CÁLCULO DE IV	87
FIGURA 5.22 – HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DE 320 EDIFÍCIOS,	88
FIGURA 5.23 – CURVA GAUSSIANA NORMAL AJUSTADA À DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE VULNERABILIDADE DE 320 EDIFÍCIOS, UNIVERSO DA AMOSTRA (260 + 60) EDIFÍCIOS	89

FIGURA 5.24 – MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE (IV) ESTIMADA DO EDIFICADO	90
FIGURA 5.25 – HISTOGRAMA DO NÍVEL DE CONFIANÇA NA AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS (EMBA)	91
FIGURA 5.26- CURVAS DE VULNERABILIDADE DO PARQUE HABITACIONAL DA ILHA DO FAIAL	92
FIGURA 5.27 – DISTRIBUIÇÃO DE DANO ESTIMADO PARA IV=41,63	94
FIGURA 5.28 – CENÁRIO DE DANO PARA	95
FIGURA 5.29 – CENÁRIO DE DANO PARA	95
FIGURA 5.30 – CURVAS DE FRAGILIDADE (IV= 41,62)	96
FIGURA 5.31 – PROBABILIDADE DE COLAPSO E PROBABILIDADE DE INUTILIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS PARA DIFERENTES VALORES DE IV	97
FIGURA 5.32 – CENÁRIO DE PROBABILIDADE DE COLAPSO PARA INTENSIDADE I=IX, COM OCUPAÇÃO DE EDIFÍCIOS.	98
FIGURA 5.33 – CENÁRIO PROBABILIDADE DE COLAPSO PARA INTENSIDADE I=X, COM OCUPAÇÃO DE EDIFÍCIOS.	98
FIGURA 5.34 – PROBABILIDADE DE MORTOS/FERIDOS GRAVES E DESALOJADOS	99

## **LISTA DE TABELAS**

### **1 INTRODUÇÃO**

TABELA 1.1 – OS MAIS RECENTES SISMOS DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES, RETIRADO DE “BASE DE DADOS SÍSMICOS DOS AÇORES”.	3
--	---

### **3 CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL**

TABELA 3.1– TIPOS DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS	15
--	----

### **4 CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS DANOS OBSERVADOS**

TABELA 4.1 – CONVERSÃO DOS DANOS OBSERVADOS NA ESCALA EMS_98, [GRUNTHAL, 1998]	56
--	----

### **5 AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO**

TABELA 5.1 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS MATERIAIS VULCÂNICOS E O TIPO DE TERRENO, EC8 [CEN, 2004]	62
TABELA 5.2 – CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE AVALIAÇÃO VULNERABILIDADE	66
TABELA 5.3 – PARÂMETROS E PESOS ASSOCIADOS PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	71
TABELA 5.4 – PARÂMETROS E PESOS ASSOCIADOS PARA EDIFÍCIOS LOCALIZADOS EM ZONA SÍSMICA TIPO 2, SEGUNDO EC8 [CEN, 2004]	83
TABELA 5.5 – PARÂMETROS MODIFICADORES DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE	84
TABELA 5.6 – DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONFIANÇA	91
TABELA 5.7 – ESTIMATIVA DE COLAPSOS E EDIFÍCIOS INUTILIZÁVEIS PARA A AMOSTRA DE 260 EDIFÍCIOS	97
TABELA 5.8 – RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE MORTOS/FERIDOS GRAVES E DESALOJADOS	99







# ***CAPÍTULO 1***

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Os fenómenos sísmicos sempre fascinaram o Homem pelas suas consequências devastadoras. Nos últimos 100 anos, esses fenómenos têm reclamado centenas de milhares de vidas, porém mesmo com os avanços tecnológicos esse número pouco tem reduzido. É segundo esta realidade que surge uma motivação para a investigação sobre estes fenómenos e os seus efeitos nas construções. Contribuindo para um maior conhecimento na forma de actuar na prevenção e redução do risco sísmico.

O risco sísmico determina o potencial para consequências negativas devido a fenómenos sísmicos que possam ocorrer numa área específica num determinado período de tempo. Especificamente o risco sísmico avalia as consequências económicas, sociais e ambientais de um determinado evento sísmico. Nas últimas décadas verifica-se uma crescente preocupação na avaliação do risco sísmico, assim como para outras catástrofes naturais, por apresentar um papel essencial no planeamento urbano e na gestão do risco de áreas susceptíveis. O desenvolvimento do estudo da vulnerabilidade em centros urbanos e áreas rurais pode ser conduzido de forma a focalizar as fragilidades dos edifícios e redução do risco sísmico, permitindo uma melhor avaliação de possíveis intervenções do ponto de vista da reconstrução e reabilitação.

Actualmente verifica-se uma acentuada degradação do património edificado nos centros urbanos e nos meios rurais, essencialmente por factores da ordem socio-económica. A crescente consciencialização desta problemática justifica as necessidades de reabilitação do edificado

[GECORPA *et al.*, 2001]. O diagnóstico de edifícios apresenta-se como um instrumento importante no planeamento de intervenções num conjunto de edifícios como também na obtenção de respostas para reabilitação de um edifício isolado. Assim a análise da vulnerabilidade surge como uma ferramenta de apoio a decisões de reabilitação em edifícios. Tendo em consideração os aspectos estruturais, funcionais e operativos proporcionando informação útil no planeamento e ordenamento urbano e prevenção do risco Sísmico [Vicente, 2008].

## 1.2 SISMOS NOS AÇORES

Em todo o mundo são registados mais de 1 evento sísmico por hora, a figura 1.1 apresenta as distribuições desses eventos a nível mundial desde 1962 até 1998.

Sendo o Arquipélago dos Açores um exemplo notável de actividade vulcânica e sísmica em Portugal, pelo seu enquadramento geotectónico. Localizado na junta tripla das placas Euro-asiática, Norte Americana e Núbia que manifesta usualmente um elevado número de microssismos e periodicamente por sismos moderados a fortes [Nunes, 2008].

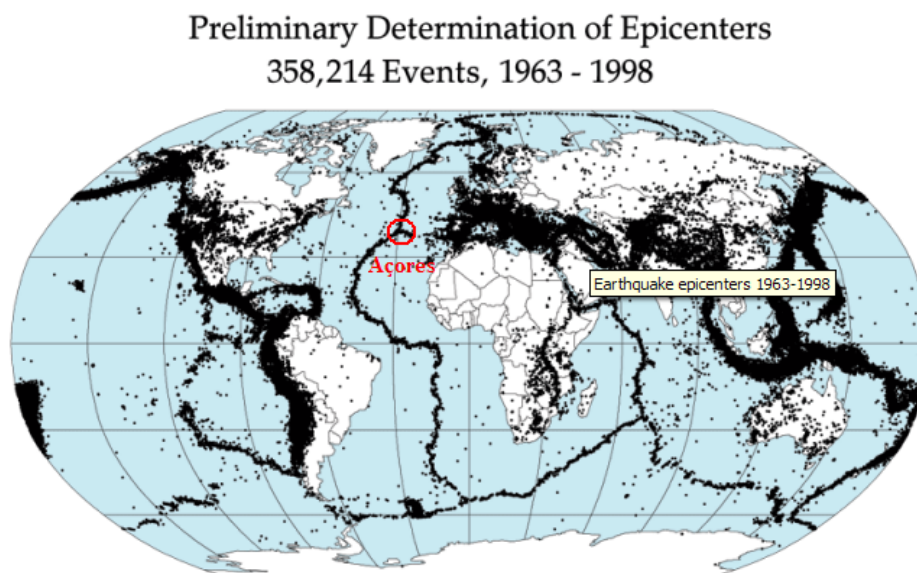


Figura 1.1 – Epicentro dos eventos sísmicos, imagem retirada e adaptada de [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

Ao longo das últimas décadas o Arquipélago dos Açores tem assistido a diversos eventos sísmicos como podemos verificar na tabela 1.1.

O sismo ocorrido a 9 de Julho de 1998 no grupo central dos Açores afectou grandemente as ilhas do Faial e Pico. Tendo atingido a magnitude de 6 na escala de Richter, com o epicentro localizado a cerca de 15 quilómetros a Nordeste da Ilha do Faial, danificou cerca de 5000 edifícios dos quais 2100 ficaram destruídos, de um total de 8720 alojamentos [Censos, 2001].

Tabela 1.1 – Os mais recentes sismos do Arquipélago dos Açores, retirado de “Base de dados sísmicos dos Açores”.

Local	Ano	Magnitude
Terceira	1980	7,2
Santa Maria	1984	5,3
São Miguel	1988	5,8
Graciosa	1989	5,7
Santa Maria	1991	5,3
Faial	1993	5,0
São Miguel	1997	5,6
Faial	1998	5,8
Graciosa	2004	4,3
São Miguel	2006	3,1

A ilha do Faial apresenta um parque habitacional caracterizado por um elevado numero de construções em alvenaria de pedra [Costa *et al.*, 2008b], construídas na sua maioria anterior ao século XIX [Costa, 2008]. As estruturas essencialmente de alvenaria de pedra apresentam em regra geral menos de três pisos, sendo estes efectuados em estruturas de madeira ou betão armado. Estas construções de uma forma global apresentam problemas de manutenção devido às frequentes actividades sísmicas, consequentemente são adoptadas soluções de reforço pouco adequadas. Como por exemplo a existência de lajes de betão que confere uma maior resistência, no entanto conta com um acréscimo de peso para a estrutura ao nível dos pisos que agrava os efeitos da acção sísmica [Neves, 2004].

É neste contexto que surge a necessidade de proceder a uma avaliação estrutural num parque habitacional que à partida apresenta um elevado índice de vulnerabilidade. Em complementaridade, as comemorações dos 10 anos do sismo de 1998 permitiram agregar um elevado número de informação de carácter científico essencial ao desenvolvimento do presente trabalho.

### 1.3 OBJECTIVOS

O objectivo da presente dissertação consiste na avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da ilha do Faial, procurando descrever melhor o desempenho do tipo de construção existente. Com o intuito de proceder a este objectivo seguiram-se duas abordagens.

A primeira abordagem é dar a conhecer os elementos de estudo, criando uma base de dados referente às características dos edifícios compilando a informação necessária para aplicar os métodos de cálculo da vulnerabilidade sísmica. Fazendo referências à caracterização do parque habitacional e a classificação dos danos observados no sismo de 9 de Julho de 1998 na ilha do Faial. Onde na caracterização do parque habitacional pretende-se dar a conhecer as tipologias construtivas dos edifícios e na classificação dos danos é criada uma proposta original qualitativa dos danos observados.

Na segunda abordagem pretende-se caracterizar a vulnerabilidade sísmica do parque habitacional da ilha do Faial, recorrendo a um modelo estatístico desenvolvido por [Vicente, 2008], sendo uma adaptação da metodologia do National Group for Defense from Earthquakes [GNDT-SSN, 1994] na avaliação da vulnerabilidade e [Giovinazzi *et al.*, 2003] na estimativa de dano. A partir da metodologia aplicada na avaliação da vulnerabilidade sísmica das construções de alvenaria, obtendo um índice de vulnerabilidade por edifício, é possível estimar o dano físico, construir curvas de fragilidade, avaliar perdas económicas e humanas. A construção de cenários sísmicos com recurso a uma ferramenta de análise espacial [ArcGis, 2005], permitindo ter a informação georeferenciada e integrar todo o algoritmo probabilístico na construção de cenários de risco.

Por outro lado pretende-se validar e calibrar o método aplicado uma vez que é possível confrontar os resultados do método com os danos observados no sismo de 9 de Julho de 1998 nos Açores. Deste modo a calibração permite obter um método mais adequado para edifícios constituídos em alvenaria de pedra.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No presente capítulo consta a introdução, onde se apresenta as considerações gerais da dissertação, faz-se uma breve referência aos sismos dos Açores, descreve-se os objectivos e a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 descreve a recolha das informações, o tratamento e compilação das informações necessárias para a elaboração da dissertação.

O capítulo 3 tem como intuito caracterizar o parque habitacional da ilha do Faial, realçando as alterações introduzidas ao nível dos tipos construtivos e dos materiais ao longo das últimas décadas. Na sequência das diversas catástrofes naturais (sismos e vulcões) que têm assolado a ilha e na procura da melhoria da qualidade habitacional surgem sucessivas alterações nos edifícios. Assim é evidenciada a importância da caracterização do parque habitacional pelo escasso conhecimento das tipologias construtivas que representam a ilha do Faial.

No capítulo 4 apresenta-se o tratamento dos resultados dos danos verificados no parque habitacional da ilha do Faial, onde se procura fornecer uma série de informações e análises. Os dados foram recolhidos a partir dos elementos da Base de Dados, que foi criada na sequência do Processo de Reconstrução encetado pelo Governo Regional dos Açores após o sismo de 9 de Julho de 1998, e posteriormente desenvolvida para a elaboração do livro “Sismo 1998 – Açores, uma década depois”.

O aspecto principal do capítulo 5 é a aplicação de uma metodologia do designado nível II para determinar a vulnerabilidade sísmica de edifícios. Este método indirecto determina previamente o nível de vulnerabilidade para cada edifício, e posteriormente, o dano físico e relacionando com a intensidade do sismo. O método é aplicado na avaliação da vulnerabilidade de 353 edifícios na ilha do Faial no Grupo Central do Arquipélago dos Açores. Este estudo foi antecedido de um levantamento de um vasto conjunto de informações detalhadas sobre os edifícios ao nível da caracterização das construções (geometria, técnica construtiva, caracterização mecânica, etc.).

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do trabalho, como também descreve possíveis trabalhos futuros.



## ***CAPÍTULO 2***

### **2 LEVANTAMENTO DE DADOS, INVENTÁRIO**

#### **2.1 RECOLHA DE INFORMAÇÃO**

No âmbito das comemorações dos 10 anos do sismo de 1998 foram efectuadas recolhas de informações com o objectivo de elaborar diversos trabalhos, nomeadamente o livro “Sismo 1998 Açores – uma década depois” [Oliveira *et al.*, 2008a]. A recolha dos dados teve a duração de 8 meses durante o ano de 2007, grande parte das informações estavam arquivadas na Secretaria Regional da Habitação e Equipamento da ilha do Faial cuja consulta foi permitida pelas autoridades competentes.

Os elementos de estudo utilizados para desenvolver a presente dissertação foram os autos de vistoria, levantamentos arquitectónicos, projectos de execução e registos fotográficos existentes na Secretaria Regional da Habitação e Equipamento. Os autos de vistoria são documentos elaborados pelo Governo Regional dos Açores através do Centro de Promoção da Reconstrução (CPR) de forma a dar resposta à crise sísmica de 1998, cujo pressuposto visava a identificação dos elementos estruturais dos edifícios e os seus danos, acompanhado de um registo fotográfico. Estas vistorias foram realizadas por técnicos e fiscais de obras públicas, logo após o sismo por toda a ilha do Faial. Os levantamentos arquitectónicos e os projectos de execução foram elaborados por gabinetes de engenharia e arquitectura intervenientes no processo da reconstrução.

A caracterização do parque habitacional descrita no capítulo 3 e a classificação dos danos observados na ilha do Faial descrita no capítulo 4, foi efectuada a partir da consulta dos autos de



vistoria e dos levantamentos arquitectónicos. O capítulo 5 teve como base a consulta dos elementos dos gabinetes de projecto, nomeadamente os projectos de execução e as suas peças desenhadas.

A recolha destes dados foi compilada em ficheiros Microsoft Office Excel®, onde apresenta um total de 63 parâmetros de informação organizados em colunas.

### **2.2 FERRAMENTA SIG**

Recorreu-se ao programa [ArcGis, 2005] por permitir representar geograficamente as características do edificado segundo a informação existente na base de dados como também as informações adquiridas pela análise da vulnerabilidade sísmica. Através da morada de cada edifício existente na base de dados foi possível a identificação geográfica de grande parte dos edifícios, com o objectivo de uma representação espacial das informações tratadas.

A escolha da ferramenta SIG (Sistema de Informação Geográfica) demonstra uma elevada utilidade, pois permite a análise, facilita gestão e representação espacial das informações. O Sistema de Informação Geográfica permite organizar a informação em diferentes camadas temáticas, de modo a relacionar diferentes tipos de informação de modo rápido e dessa forma gerar nova informação, como por exemplo cruzar as características dos edifícios com a sua ocupação.

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) facilita bastante a análise de cenários sísmicos. Este tipo de ferramentas de análise georeferenciada, permite a manipulação, armazenamento e mapeamento de elevados volumes de informação. Para além deste tipo de utilização, pode ainda ser bastante útil na protecção civil. A figura 2.1 apresenta o aspecto gráfico do programa utilizado para gerir as informações em estudo.

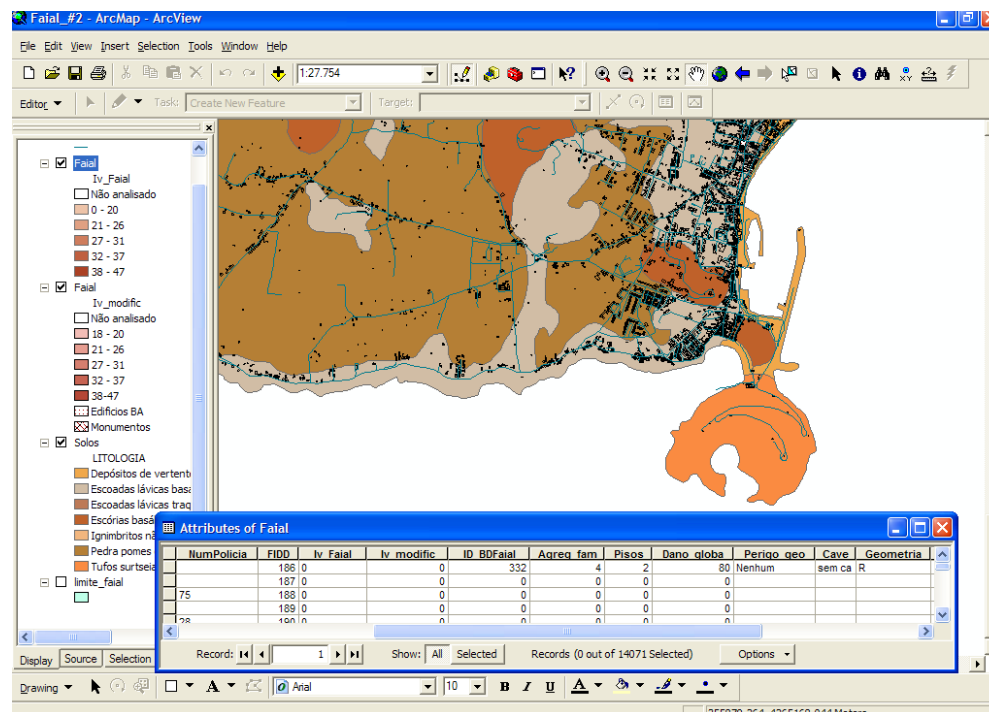


Figura 2.1 Aspecto gráfico do programa ArcMap 9.2

## 2.3 PROBLEMAS COM BASES DE DADOS

A compilação das informações recolhidas numa única base de dados revelou algumas dificuldades. Na medida em que para uma dada base de dados não existe uma forma de quantificar o nível de reconhecimento dos vários parâmetros. Quando se compara diferentes bases de dados encontra-se uma grande dificuldade em cruzar informações especialmente em parâmetros introduzidos por escrita livre (como nome, morada, intervenção, etc.), podendo ocorrer diferentes resultados em função do nível de reconhecimento. Para cruzar várias bases de dados é necessário medir o reconhecimento de cada parâmetro que permita obter resultados fiáveis.

Outra das grandes dificuldades para o cruzamento das várias bases de dados deve-se ao facto de não existir um parâmetro comum a todas as base de dados, sendo que o parâmetro de referência é o nome do sinistrado. Ora, quando se pretende caracterizar o parque habitacional o parâmetro de referência deveria ser a localização do edifício. Para tal é indispensável que exista conformidade na definição dos critérios para a designação das ruas. A origem deste problema reside no facto de permitir ao utilizador da base de dados introduzir novos registos nos parâmetros,

por exemplo na morada, possibilitando a designação de diferentes nomes para uma mesma morada introduzindo informação incorrecta.

Recomenda-se que no exercício do levantamento de um parque habitacional seja feita de imediato uma georeferenciação para cada edifício, considerando as articulações de ligação a outras bases de dados como as identificadas pelo INE. O levantamento do parque habitacional deve considerar todos os edifícios existentes e não apenas os edifícios atingidos ou com “estatuto de sinistrado”. Assim permite a visualização instantânea do cenário geográfico como também das características do parque habitacional.

## ***CAPÍTULO 3***

### **3 CARACTERIZAÇÃO DO PARQUE HABITACIONAL**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

A arquitectura tradicional da ilha do Faial apresenta uma simplicidade construtiva baseada na utilização da alvenaria de pedra e madeira, marcada pelos seus elementos característicos: balcões, cisternas, lojas, fornos e pela organização dos espaços, que confere à construção açoriana o direito a ser considerado património da humanidade pela sua riqueza e variedade formal na conjugação dos diversos elementos construtivos que constituem essas construções. A sua preservação deverá ser uma obrigação de todos os que intervêm no processo de construção e de reconstrução. Na sequência de um sismo e face à má resposta sísmica que algumas dessas construções apresentam, muitas vezes associadas à falta de manutenção ou a danos sofridos em sismos anteriores, leva a que as pessoas introduzam alterações profundas aos sistemas construtivos tradicionais e técnicas e materiais que vão adulterar as construções tradicionais. O conhecimento do tipo de construção tradicional que se manteve, na sequência do sismo de 9 de Julho de 1998 e o tipo de alterações que foram introduzidas é de extrema importância para o conhecimento futuro do comportamento dessas construções. Por outro lado, o comportamento estrutural do parque habitacional irá permitir perceber quais foram os sistemas construtivos que melhor se comportaram e ser possível avaliar os tipos de danos mais comuns em cada um desses sistemas construtivos. Para além das tipificações estruturais e respectivas descrições, procede-se igualmente à análise espacial de alguns dos principais resultados apresentados ao nível da freguesia, na ilha do Faial (figura 3.1).

A caracterização do parque habitacional foi baseada nas seguintes temáticas:

- Tipo construtivo
- Existência de cave
- Geometria do edifício
- Existência de edifícios contíguos
- Tipo de estrutura de cobertura
- Tipo de pavimentos
- Tipo de parede interior
- Tipo de parede exterior

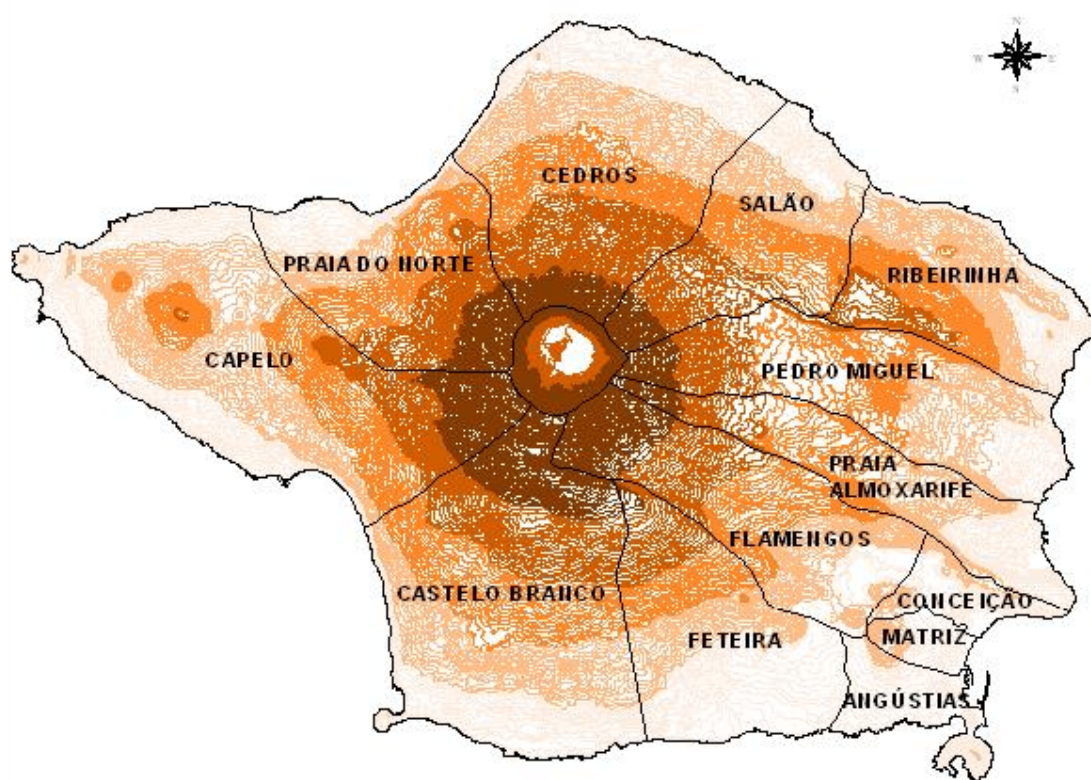


Figura 3.1– Freguesias da ilha do Faial, representado com linhas de altimetria

A representação da figura 3.1 permite identificar as freguesas da ilha do Faial e associar as respectivas características do edificado, descritas de seguida.

## 3.2 TIPO CONSTRUTIVO

O facto das ilhas dos Açores serem afectadas casualmente por crises sísmicas, resultando em reconstruções, reforços e alterações dos edifícios, contribui para uma grande variedade de tipologias construtivas. A opinião generalizada entre os sinistrados<sup>1</sup> [Lamas, 2003], de que as casas antigas de pedra não apresentam segurança face à ocorrência de sismos leva a que em muitas construções se proceda à mistura de diferentes tipos de elementos construtivos e de materiais que não eram habituais nas construções tradicionais açorianas. É interessante observar o parque edificado como um registo de tipos de construção ao longo da história de calamidades que afectaram as ilhas dos Açores.

A consulta dos diversos elementos de estudo permitiu caracterizar os seguintes sistemas construtivos: construção corrente (CC), construção mista (CM), construção tradicional (CT) e por fim construção tradicional alterada (CTA). De uma forma simples é descrita cada um do sistema construtivo.

### 3.2.1 Construção tradicional (CT)

Considera-se como construção tradicional aquela em que as paredes exteriores (fachada principal, tardo e empenas) são realizadas em alvenaria de pedra. As fachadas principais e de tardo apresentam aberturas largas para janelas e portas com vergas e ombreiras, sendo delimitadas por cunhais. Nos edifícios contíguos normalmente existentes em meios urbanos, as paredes de separação são geralmente meeiras. A espessura das alvenarias é normalmente constante, com cerca de 66 cm (“côvado”). O pavimento de soalho e as vigas de suporte são em madeira, usualmente a acácia e a criptoméria. A estrutura da cobertura é em madeira e apresenta várias formas construtivas. As paredes divisórias interiores são geralmente em tabique de madeira ou frontais.

A construção tradicional rural é essencialmente caracterizada por edifícios de piso térreo ou de dois pisos, sendo os de piso térreo de construção mais modesta e implantadas em zonas planas. Os edifícios de dois pisos procuram tirar partido da inclinação dos terrenos, sendo a cave (ou, no caso mais corrente, meia cave) destinada a loja e normalmente usada com actividades rurais e o

---

<sup>1</sup> “Sinistrado” – a pessoa cuja habitação foi destruída ou danificada pelo sismo.

primeiro andar afecto à habitação. Nos centros das freguesias é habitual encontrarem-se edifícios de rés-do-chão e 1º andar. Em muitos edifícios o forno localiza-se na parte trás ou lateralmente, juntamente com a cisterna. É frequente a existência de uma escada de acesso ao primeiro andar, construída em pedra.

A construção tradicional urbana encontra-se implementada em quarteirão ou em linha, tendo geralmente 2 a 3 pisos e raramente ultrapassando os 4. Esta construção, embora com uma organização interna mais complexa e independentemente da dimensão, possui um corpo secundário perpendicular ao tardo onde se encontra a cozinha.

### **3.2.2 Construção tradicional alterada (CTA)**

A construção tradicional alterada consiste, apenas, na substituição do pavimento de soalho e vigas em madeira por uma laje maciça de betão armado (placa), apoiada na alvenaria de pedra. Esta substituição apenas é realizada numa pequena área da habitação, normalmente muito reclamada pelos sinistrados como solução para as zonas húmidas (cozinha e casa de banho). Tal como na construção tradicional (CT) as paredes divisórias são constituídos por elementos de madeira, podendo ser em tabique ou em frontais. A estrutura da cobertura é constituída por elementos de madeira. Deste modo o edifício assemelha-se a uma construção tradicional, não sendo efectuado nenhuma ampliação.

### **3.2.3 Construção corrente (CC)**

Este tipo de construção engloba a restante construção, que se pode caracterizar por ser realizada por uma estrutura resistente em betão armado, com paredes em alvenaria de blocos de cimentos, confinada ou não, com pavimentos em betão armado. A estrutura da cobertura neste tipo de construção pode ser em betão armado como também em estrutura de madeira.

### **3.2.4 Construção mista 1 (CM1)**

A construção mista tipo 1 consiste na substituição do pavimento de soalho e vigas em madeira por uma laje maciça de betão armado apoiada na alvenaria de pedra pelo lado interior do edifício, eventualmente poderá existir pilares a meio vão da laje. Nestes casos as paredes divisórias

são em blocos de cimento e/ou tabique de madeira e mantendo-se a estrutura da cobertura em madeira.

### 3.2.5 Construção mista 2 (CM2) CT+CC

A construção mista tipo 2 apresenta uma intervenção relacionada com uma ampliação. Nesta nova ampliação a estrutura resistente são pilares, vigas e laje de betão armado. Os elementos estruturais da construção original (cobertura, pavimento e paredes) são conservados.

### 3.2.6 Construção mista 3 (CM3)

Este tipo de construção apresenta um maior grau de intervenção, sendo caracterizada por uma alteração integral do pavimento, paredes exteriores e interiores. O pavimento é em laje maciça de betão armado apoiado em pilares e vigas e com as paredes exteriores e interiores realizadas em blocos de cimento. Relativamente à construção original apenas são conservados os elementos estruturais da cobertura. Na tabela 3.1 estão sintetizados os tipos construtivos e os seus elementos estruturais.

Tabela 3.1– Tipos de sistemas construtivos

Tipo Construtivo	Elementos resistentes verticais	Pavimento	Estrutura da Cobertura
CC	Resistente em betão	Laje de betão armado	Betão armado ou Madeira
CM1	Alvenaria de pedra	Laje de betão armado	Madeira
CM2(CT+CC)	Alvenaria de Pedra + Pilares e vigas de	Madeira e laje de betão armado na ampliação	Madeira
CM3	Pilares e vigas de betão armado	Laje de betão armado	Madeira ou betão armado
CT	Alvenaria de pedra	Madeira	Madeira
CTA	Alvenaria de pedra	Parte da construção é laje de betão armado (cozinha e/ou WC)	Madeira



Na figura 3.2 é possível identificar geograficamente os diferentes sistemas construtivos de um conjunto habitacional da cidade da Horta na ilha do Faial, com o recurso à ferramenta SIG.

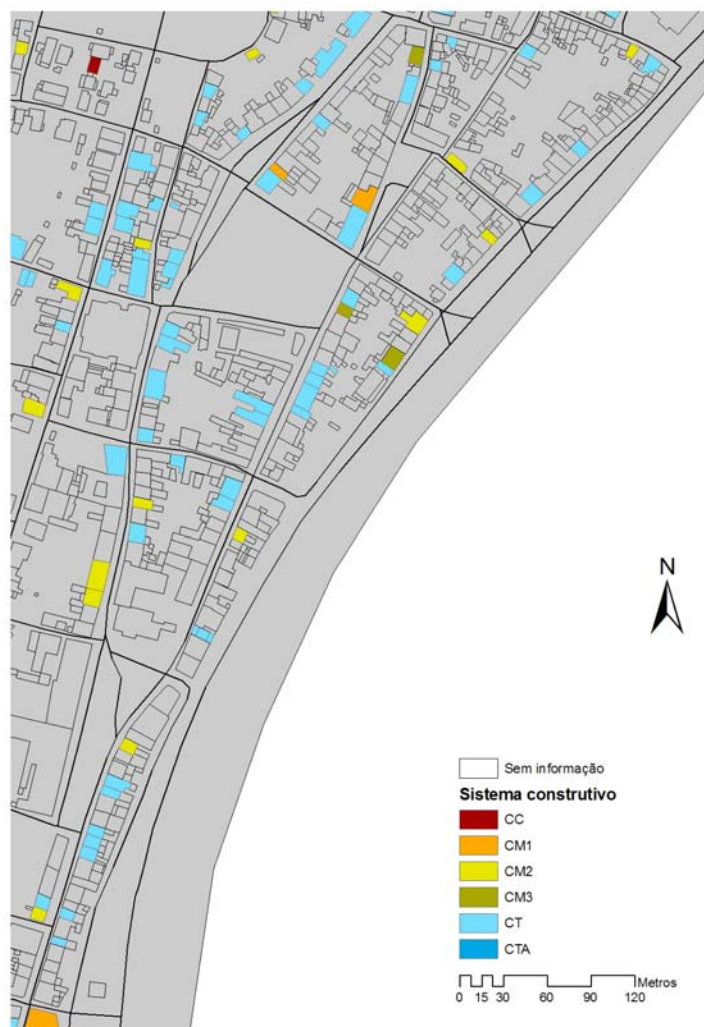


Figura 3.2– Representação espacial do sistema construtivo, através do SIG

### **3.3 TRATAMENTO DOS RESULTADOS**

A consulta da base de dados permitiu concluir que a maioria das construções existentes nas ilhas do Faial, aquando da ocorrência do sismo de 9 de Julho de 1998, eram construções tradicionais, conforme se pode ver nas figura 3.3 e figura 3.4. Cada um dos gráficos seguintes

apresenta o seu universo, verifica-se que estes universos não são constantes devido ao cruzamento de informações, onde cada parâmetro tem uma dada amostra.

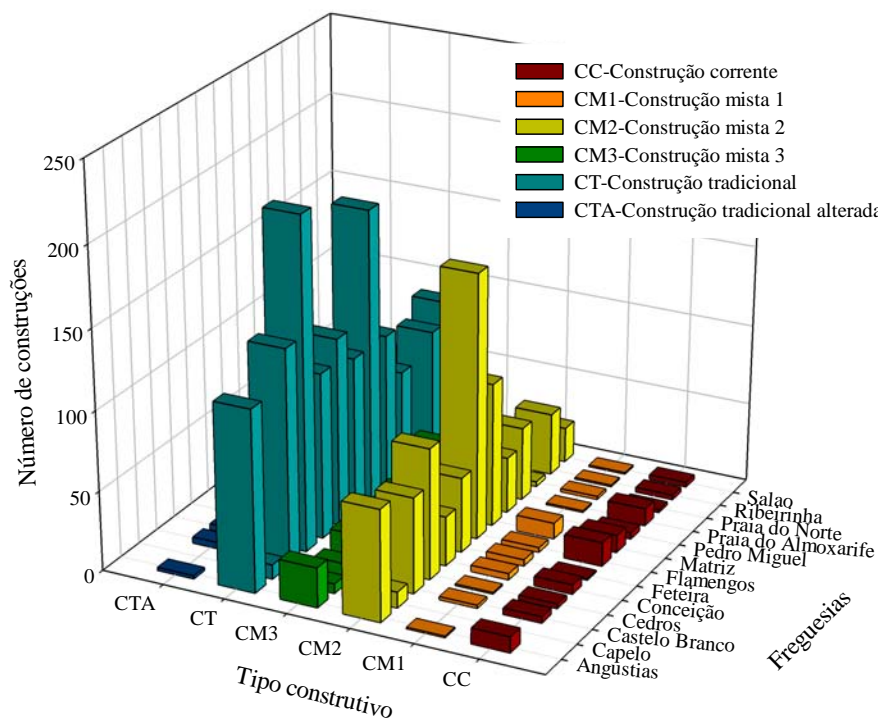


Figura 3.3 – Tipo de construção por freguesia no Faial (Universe 2305)

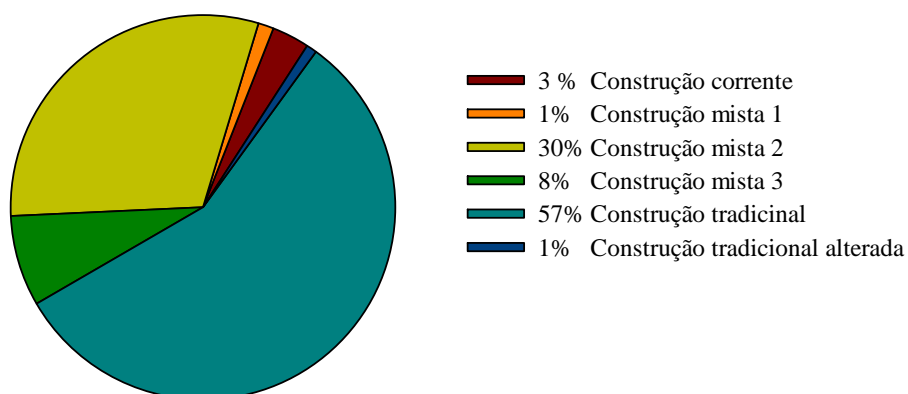


Figura 3.4 – Percentagem de tipos de construção no Faial (Universe 2305)

### 3.4 EXISTÊNCIA OU NÃO DE CAVE

Devido ao relevo acentuado das ilhas do Faial, a construção tradicional é caracterizada pela adaptação do edifício ao perfil do terreno. Esta temática que relaciona o edifício relativamente à implantação dos elementos estruturais que se localizam abaixo da cota do terreno, é descrita da seguinte forma: cave, meia cave e sem cave. Na figura 3.5 e figura 3.6 pode ver-se a distribuição destes tipos de edifícios por freguesias das ilhas do Faial.

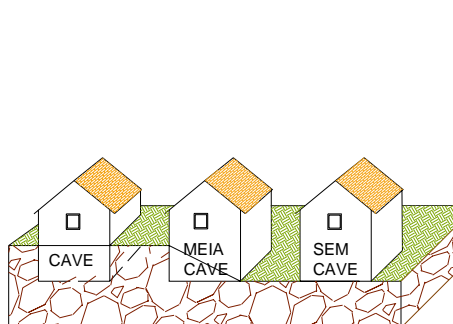


Figura 3.5 – Esquema representativo do tipo de cave

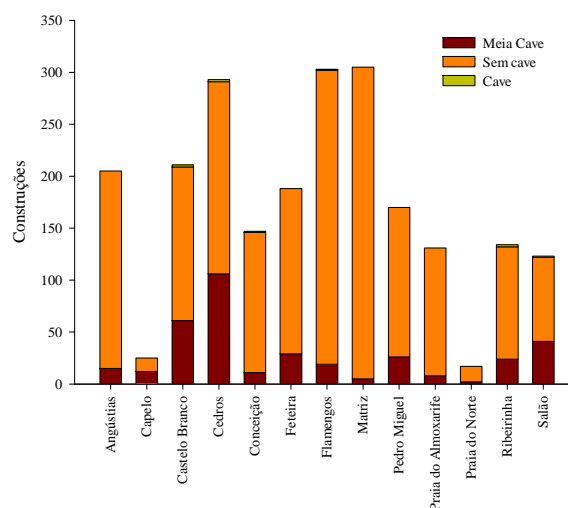


Figura 3.6 – Tipo de cave por freguesia  
(Universe da amostra 2252)

### 3.5 GEOMETRIA EM PLANTA DO EDIFÍCIO E NÚMERO DE PISOS

A geometria do edifício procura caracterizá-lo através da forma em planta e do nº de pisos. Em planta procurou-se englobar os edifícios nas figuras geométricas mais comuns como sejam: rectângulo; quadrado; “L” e “U”. Nos edifícios representativos de rectângulos os compartimentos organizam-se em linha, usualmente com a cozinha num extremo. Os edifícios em “L” são representados por dois corpos, geralmente o maior é onde se encontram os quartos e no menor fica a cozinha perpendicular a este. Em altura, os edifícios são classificados pelo seu número de pisos.

Na figura 3.7 e figura 3.8 pode-se ver a distribuição destes tipos de edifícios por freguesias das ilhas do Faial e do Pico.

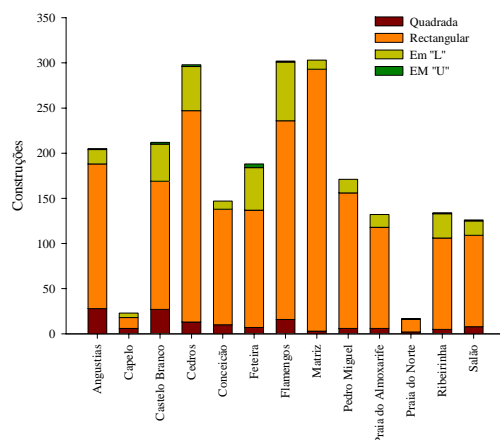


Figura 3.7 – Geometria dos edifícios por freguesias (Universe da amostra 2258)

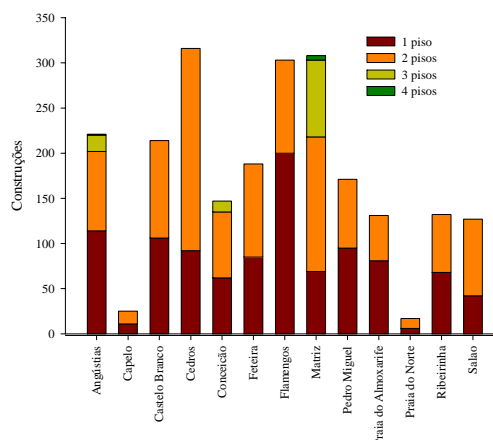


Figura 3.8 – Número de pisos por freguesia (Universe da amostra 2300)

Como se pode observar na figura 3.7 a geometria rectangular é a mais representativas na ilha do Faial. Pela figura 3.8 verifica-se que na maioria das freguesias os edifícios apresentam 2 pisos e nas freguesias que constituem a Cidade da Horta (Angústias, Matriz e Conceição) o número de pisos é superior a 2 com a freguesia da Matriz a apresentar edifícios com 4 pisos.

### 3.6 EXISTÊNCIA DE EDIFÍCIOS CONTÍGUOS

Esta classificação permite perceber da existência de edifícios contíguos a outros adjacentes, aspecto este muito importante no comportamento sísmico dos conjuntos edificados. Esta temática dá origem às seguintes classes: isolado, com um edifício contíguo e entre edifícios, figura 3.9.

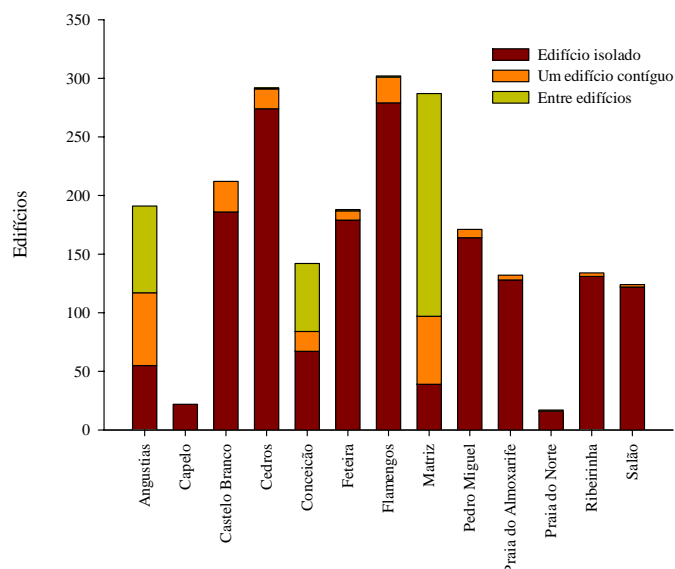


Figura 3.9 – Existência de edifícios contíguos por freguesia (Universo da amostra 2214)

Como se pode observar na figura 3.9, apenas as freguesias mais representativas da ilha do Faial apresentam edifícios em banda, representativos da existência de quarteirões, que são típicos de cidades. Neste caso temos edifícios entre edifícios essencialmente na Cidade da Horta (freguesias de Angústias, Matriz e Conceição). Por outro lado, a maioria das freguesias rurais apresenta o edifício isolado como predominante, na maioria das situações atingindo os 100%.

### 3.7 TIPO DE ESTRUTURA DA COBERTURA

A estrutura de suporte da cobertura em telha é essencialmente de dois tipos, com ou sem asna. As estruturas com sem asna designam-se cobertura à “francesa”, em “tesoura” e em “tesoura”. As com asna são designadas de asna simples. Todas elas são constituídas geralmente por elementos de madeira apoiados em paredes-mestras, sendo comuns os telhados de 2 águas.

Nas coberturas é frequente a existência de ripas de pequena rigidez, o que contribui para um funcionamento em conjunto da cobertura. Verifica-se que a ligação dos elementos de madeira às alvenarias de pedra são deficientes, permitindo deslocamentos e riscos de queda face a uma acção sísmica. O tipo de cobertura mais frequente é o representado na figura 3.10 e figura 3.11, constituído por 2 águas de varas inclinadas, de dimensões variáveis (entre  $0,14 \times 0,05$  e  $0,19 \times 0,07$

m), espaçadas de 0,35 m a 0,40 m, que suportam o forro. As varas na parte superior ligam-se no cume umas às outras de várias maneiras (tábua fina ao alto; entalhe; apoio directo umas nas outras, etc.) e na parte inferior apoiam num frechal, normalmente de  $0,10 \times 0,10$  m, que por sua vez se apoia na parede. O frechal, que deve correr todo o coroamento da parede, fazendo uma espécie de viga-cinta, é ligado entre paredes por vigas de madeira de secção variada (rectangular, circular ou irregular). Estas vigas de madeira, espaçadas de 2 a 2,5 m, correspondem a tirantes que equilibram as forças horizontais transmitidas pela cobertura ao frechal.



Figura 3.10 – Cobertura típica da ilha do Faial



Figura 3.11 – Pormenor da cobertura típica da ilha do Faial

Os outros tipos de cobertura que se encontram são à “francesa”, figura 3.12, e à “cavalo”, figura 3.13. O tipo telhado à “tesoura”, figura 3.14, é mais comum nos edifícios rurais, enquanto que nos edifícios urbanos são mais frequentes o tipo à “francesa” e à “cavalo”. Sobre as estruturas das varas é fixado o forro ou guarda-pó de tábuas trincadas onde é assente a telha regional de canudo.

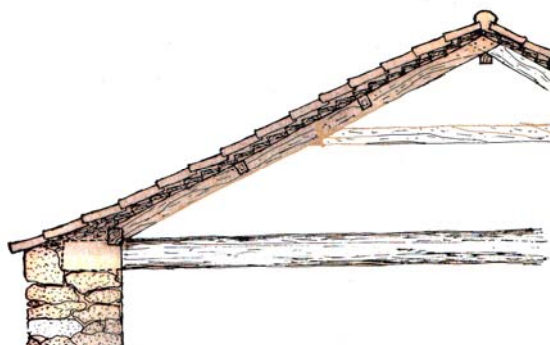


Figura 3.12 – Telhado à Francesa

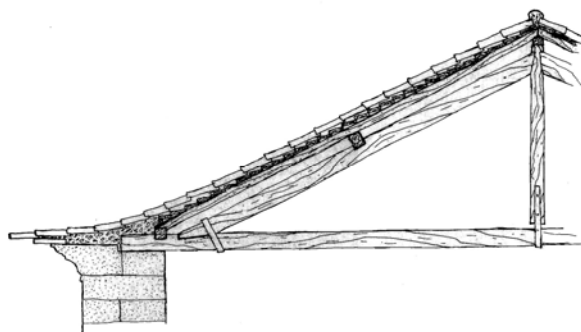


Figura 3.13 – Telhado à Cavalo

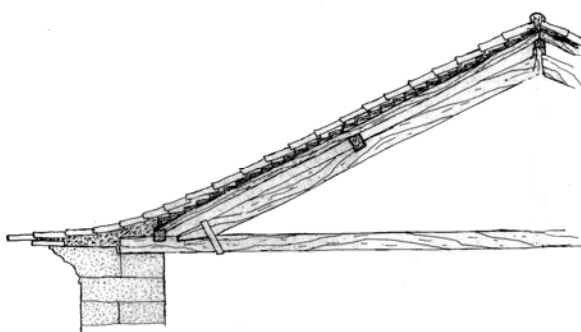


Figura 3.14 – Telhado em Tesoura

Em algumas construções encontram-se asnas simples com escoras, representada na figura 3.15. Na figura 3.16 pode-se ver a distribuição do tipo de coberturas mais frequente na ilha do Faial. De referir que esta amostra é referente a um total de 216 edifícios, sendo 101 edifícios urbanos e 115 edifícios rurais, sobretudo nas freguesias da Matriz, Cedros e Praia do Almoxarife, como tal não é representativa do Universo existente na ilha do Faial.

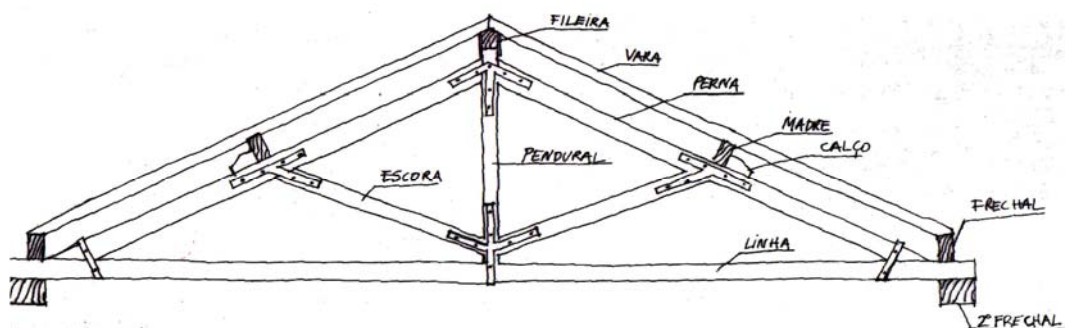


Figura 3.15 – Tipo de asna mais frequente, retirado de [Lamas, 2003]

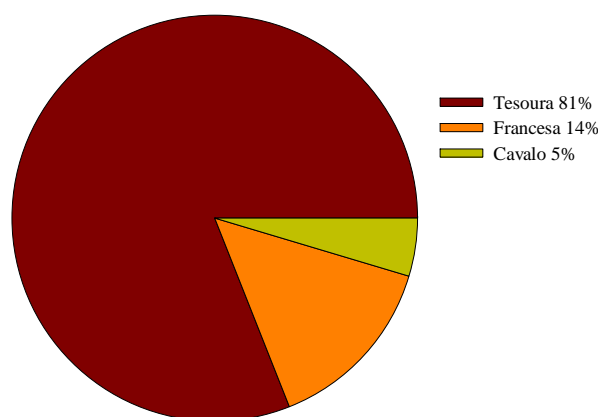


Figura 3.16 – Tipos de estruturas das coberturas (Universo da amostra 216)

### 3.8 TIPO DE PAVIMENTO

Os tipos de pavimento mais frequentes são constituídos por soalho e vigas de madeira, estando as vigas espaçadas na ordem dos 0,40 m e encaixadas nas paredes de alvenaria de pedra, figura 3.17, vencendo vãos de 3,50 a 4,00 m. Em alguns edifícios as vigas assentam sobre frechais de secção 0,10 × 0,10 m. Os frechais contribuem para uma melhor distribuição das cargas pontuais das vigas em todo o comprimento da parede, fazendo o pavimento trabalhar em conjunto. O soalho é constituído por tábuas de madeira com uma espessura que varia entre 0,022 e 0,025 m, assente no vigamento.

Verifica-se que em alguns edifícios foi efectuada a substituição integral dos elementos em madeira por vigas e laje de betão armado. Em alguns casos foi aplicada uma lajeta de betão armado



nas zonas húmidas da casa que se apoia no vigamento de madeira existente. Verifica-se também nas novas ampliações dos edifícios a execução da laje em betão armado. Nestes casos, é designado de laje mista na definição do tipo de pavimento, por existir dois tipos de lajes diferentes para o mesmo edifício. Na figura 3.18 pode ver-se a distribuição, por percentagens, do tipo de pavimentos na ilha do Faial.

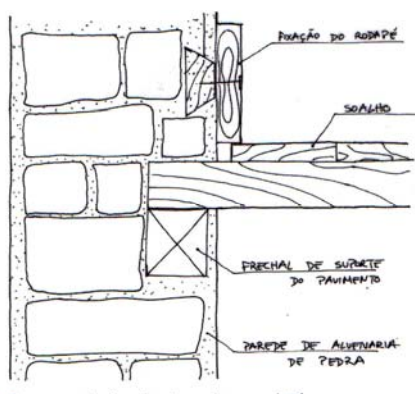


Figura 3.17 – Ligações das vigas à alvenaria de pedra, retirado de [Lamas, 2003]

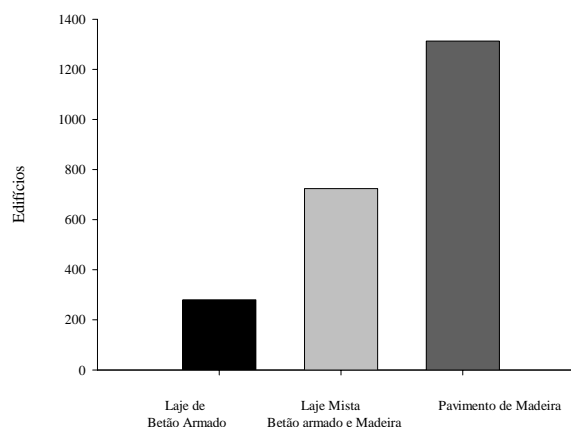


Figura 3.18 – Tipos de Pavimento (Universo da amostra 2317)

### 3.9 TIPO DE PAREDE INTERIOR

As paredes divisórias desempenham alguma função estrutural numa acção sísmica, mesmo sendo elementos ligeiros e de fraca resistência. Apesar da pequena rigidez que a maioria das paredes interiores apresenta, elas acabam por contribuir para o contraventamento global, acrescentando também alguma resistência à flexão às alvenarias de pedra no sentido exterior/interior. Verificaram-se casos de colapso total das alvenarias de pedra, ficando apenas as divisórias interiores a suportar a estrutura da cobertura, figura 3.19. As paredes divisórias interiores em pisos térreos geralmente apresentam maior peso próprio, sendo em alvenaria de pedra ou blocos de cimento, conferindo maior resistência ao edifício. O tabique em madeira é uma parede de duas faces de fasquiado de madeira em prumos afastados de 0,50 a 0,70 m, figura 3.20. O fasquiado de madeira é rebocado com estuque, argamassa de cal, areia e barro, podendo por vezes verificar-se a adição de pêlo de vaca e “cabelo humano” [Costa, 2002]. Os frontais são paredes divisórias mais

comuns nos edifícios mais modestos, geralmente só apresentam uma face. São constituídos por várias placas de madeira por vezes de diversas qualidades e dimensões, pregados a prumos com afastamentos superiores a 0,70 m. O tabuado em madeira apresenta uma face composta por tábuas alinhadas, pregadas a prumos de afastamento superior a 0,50 m.

Em construções recentes verificamos que o tipo de divisória mais comum são os blocos de cimento, em alguns casos também se verifica paredes do tipo “platex”. Na figura 3.21 pode ver-se a distribuição do tipo de parede interior nas ilhas do Faial e do Pico.



Figura 3.19 – Estrutura da cobertura apoiada em divisórias interiores de tabique de madeira

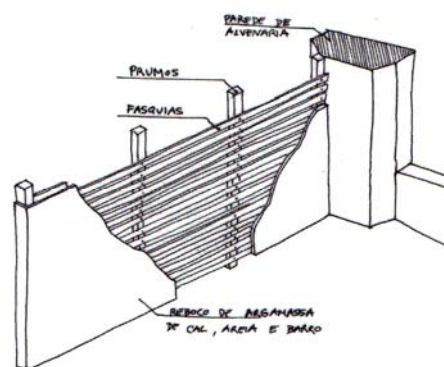


Figura 3.20 – Elementos construtivos do tabique, retirado de [Lamas, 2003]

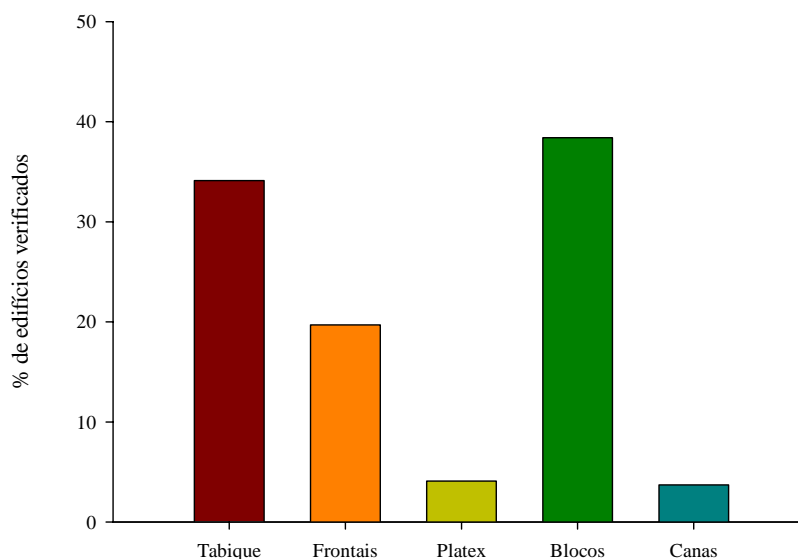


Figura 3.21 – Tipos de paredes interiores (Universo da amostra 513)

### **3.10 TIPO DE PAREDE EXTERIOR**

Quer a construção tradicional quer na construção corrente, as paredes exteriores constituem um elemento fundamental devido às suas funções estruturais, sendo estas caracterizadas por elementos construtivos verticais de secção rectangular alongada. As paredes de alvenaria tradicional constituem o elemento portante total ou parcial dos pisos, oferecendo características estruturais resistentes, suportando o vigamento da construção, constituindo o conjunto de paredes de fachada principal, tardoz e laterais (empenas). Observam-se diferentes tipos de construção de alvenaria de pedra (figura 3.22) em função das capacidades económicas dos proprietários, como também da localização do edifício, sendo os tipos de pedras mais comuns o basalto, traquito, cinerito e andesito. A espessura média das alvenarias de pedras situa-se entre os 0,65 e 0,70 m. As alvenarias de um pano, são geralmente de melhor qualidade, apresentando pedra aparelhada regular. As alvenarias de dois panos são executadas com pedras escolhidas, de comprimento ligeiramente superior a meia espessura da parede, sendo colocadas de forma imbricada. A ligação entre as duas folhas é feita com pedra miúda, com barro e cal de forma a preencher os vazios. Nas alvenarias de dois panos com ligação são empregues travessões, colocados a cerca de 1,5 m em cada camada, alternando em camadas sucessivas. As alvenarias de três folhas são geralmente mais largas e o seu interior é preenchido com lascas de pedras e barro. O revestimento das alvenarias de pedra é feito de diversas espécies de reboco, sendo o mais habitual composto por uma mistura de barro e cal de 0,02 m e sobre este é aplicado uma argamassa de cal e areia. É comum verificar-se vários rebocos aplicados em cima de outros mais antigos. O tipo de reboco aplicado correntemente é realizado na proporção de 1 de cimento para 3 de areia, adicionando-se muitas vezes 1 de cinzas vulcânicas [Costa, 2002]. Nas construções correntes, o tipo de parede predominante é constituído por alvenarias de blocos de cimento de espessuras variadas. É frequente confinar as paredes de alvenaria na estrutura de betão armado para melhorar a resistência dos elementos. Na figura 3.23 pode ver-se a distribuição do tipo de parede exterior nas ilhas do Faial.

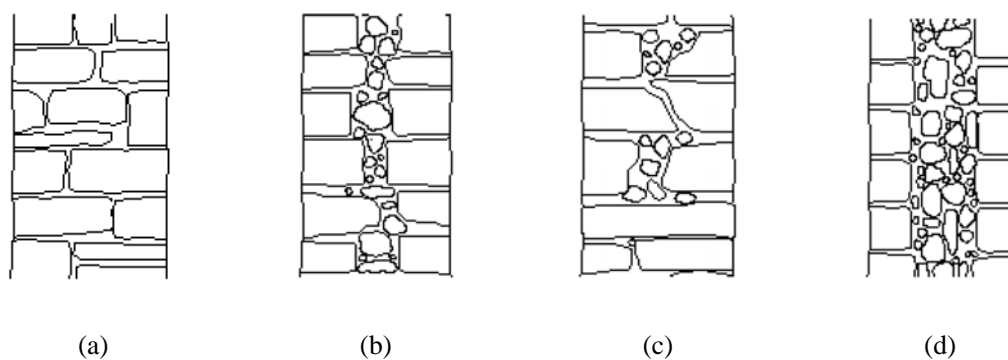


Figura 3.22 – Tipos de secção transversal das alvenarias de pedra, classificação segundo [GNDT-SSN, 1994] (a) Um pano (b) Dois panos sem ligação. (c) Dois panos com ligação. (d) Três panos com núcleo de fraca qualidade.

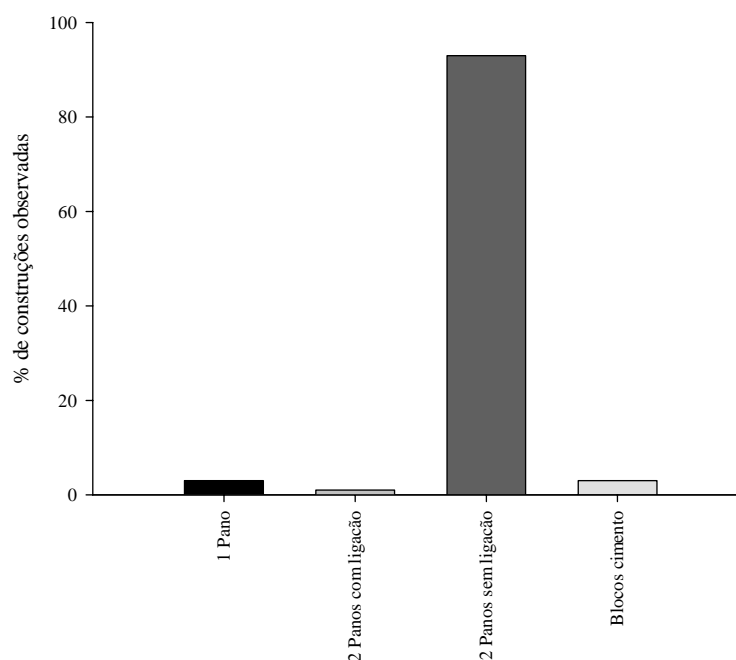


Figura 3.23 – Tipos de parede exterior (Universo da amostra 157)

### 3.11 DISCUSSÃO DOS DADOS OBTIDOS

Este capítulo procura descrever os sistemas construtivos e os materiais que compõem o parque habitacional da ilha do Faial. Este trabalho segue um enquadramento similar ao dos

levantamentos realizados para o estudo do parque habitacional da ilha Terceira, aquando do sismo de 1980 [Guedes *et al.*, 1992].

Da análise de alguns dos resultados tratados pode-se concluir que a maioria, 57%, da construção existente na Ilha do Faial, na altura do sismo de 9 de Julho de 1998 era a construção tradicional, em que as paredes exteriores, com cerca de 66 cm, são realizadas em alvenaria de pedra e com as fachadas principais apresentando aberturas largas para janelas e portas com vergas e ombreiras e delimitados por cunhais, sendo o pavimento de soalho de madeira e com vigas de suporte também em madeira, bem assim como a estrutura de cobertura. As paredes divisórias interiores são geralmente em tabique de madeira ou frontais.

Pode-se verificar que a quase totalidade dos edifícios não apresenta cave e que só uma pequena percentagem possui meia cave, salientando-se a freguesia dos Cedros que atinge 30% dos edifícios com meia cave.

No que se refere à geometria pode concluir-se que a maioria dos edifícios apresenta a forma rectangular (cerca de 78%) sendo a forma em L a que predomina em relação à quadrada e em U, esta última com pouca expressão na maioria das freguesias. No Faial, nas freguesias que constituem a Cidade da Horta (Angústias, Matriz e Conceição) são comuns edifícios com mais de 2 pisos, chegando aos 4 pisos.

Os edifícios contíguos, representativos da existência de quarteirões (banda), são típicos de cidades, nomeadamente na cidade da Horta (freguesias de Angústias, Matriz e Conceição). Como se pode observar a maioria das freguesias rurais apresenta o “edifício isolado” como predominante, atingindo os 100% na maioria das situações.

Os tipos de pavimento mais frequentes, cerca de 60%, são constituídos por soalho e vigas de madeira.

De referir que as considerações seguintes foram obtidas da análise de um universo reduzido, podendo não ser representativa da ilha do Faial.

O tipo de cobertura mais frequente, cerca de 81%, é constituído por 2 águas de varas inclinadas designada de cobertura em “Tesoura”.

As paredes divisórias interiores mais frequentes, cerca de 34%, são realizadas em tabique. Os outros tipos de paredes são, o fasquiado de madeira, os frontais, o “platex” e o tabuado em

madeira. Em construções recentes ou alteradas verifica-se que no tipo de divisória mais comum é a usado o bloco de cimento, cerca de 38%.

As paredes exteriores mais frequentes, cerca de 93%, são realizadas com 2 panos sem ligação. Em construções recentes verifica-se que o tipo de parede exterior mais comum é realizado em blocos de cimento.



## ***CAPÍTULO 4***

### **4 CLASSIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS DANOS OBSERVADOS**

#### **4.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta uma classificação de danos que constitui uma proposta original de qualificação dos danos ocorridos em estruturas de alvenaria tradicional das ilhas do Arquipélago dos Açores. Esta proposta identifica os principais tipos de danos ocorridos em estruturas e inspirou-se numa classificação utilizada para caracterizar os danos em igrejas em Itália [Giovinazzi *et al.*, 2003]. Parte deste trabalho dedica-se aos danos observados na envolvente exterior e cobertura dos edifícios e outra parte aos danos no interior, descrevendo o comportamento típico das construções no parque habitacional da ilha do Faial, procedendo-se igualmente à análise espacial de alguns dos resultados (unidade de apresentação é a freguesia).

#### **4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS EXTERIORES**

A classificação de danos foi baseada na observação de fotografias de todo o parque habitacional. Na análise das fotografias encontraram-se padrões que dependem da localização das construções e que permitirá concluir sobre a intensidade e a direcção do sismo. Esta identificação de padrões é sempre discutível e subjectiva. Neste caso procurou-se, a partir da análise das fotografias identificar os diversos tipos de danos ocorridos, procurando-se enquadrá-los dentro de uma classificação que em primeiro lugar separou os danos exteriores dos interiores. Para os danos exteriores relacionados com a envolvente externa do edifício, foram consideradas 5 categorias,



classificadas da seguinte forma: fendilhação ligeira; fendilhação acentuada; fractura; colapso e ruína. Fendilhação ligeira (D1) engloba a fendilhação generalizada (ramificação distribuída de fendas) e a fendilhação de pequena expressão (fendas inferiores a 1 mm). A fendilhação acentuada (D2) envolve toda a fendilhação que envolva movimentos relativos entre pedras e fendilhação de outra natureza, mas que não apresente movimentos das pedras ou de outros elementos para fora do plano das paredes; quando tal acontecer este dano corresponde a fracturas (D3). Por colapso (D4) entende-se a queda de elementos; quando esta tem uma grande expressão, no sentido de que pouco se pode aproveitar da habitação estaremos na presença da ruína (D5). Cada uma destas categorias foi ainda subdividida em várias sub-categorias em função do local onde apareceu o dano: fachada (F); empena (E); cobertura (C) e canto (K).

No levantamento dos danos dos edifícios é comum coexistirem vários tipos de danos. Para efeitos classificativos são considerados apenas o dano que maior grau de destruição provocou no edifício. Existem edifícios que não apresentam danos relacionados com o sismo, nestes casos considera-se sem danos (D0). Na figura 4.1 está representada a distribuição dos danos exteriores observados para o universo de 2293 construções na ilha do Faial.

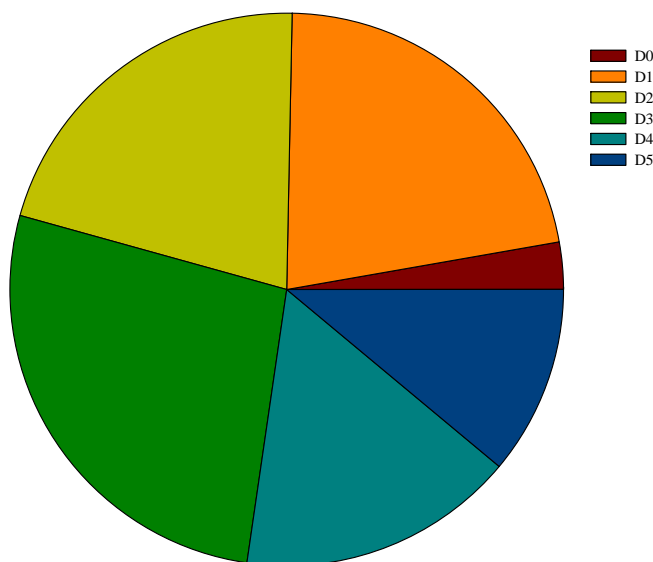


Figura 4.1 – Distribuição do tipo de dano no universo de 2293 construções

Na figura 4.2 apresenta-se a um esquema de proposta de classificação de danos. Faça-se notar que para o dano referente ao colapso (D4) se acrescentou um novo índice (de 1 a 4) que representa a percentagem de área de colapsada para cada uma das sub-categorias.

Grau	Sub-Grau	
<b>D1</b> Fendilhação ligeira	<div>D1E</div> <div>D1F</div> <div>D1EF</div>	Empena Fachada Empena e Fachada
<b>D2</b> Fendilhação acentuada	<div>D2E</div> <div>D2F</div> <div>D2EF</div>	Empena Fachada Empena e Fachada
<b>D3</b> Fractura	<div>D3E</div> <div>D3F</div> <div>D3EF</div> <div>D3K</div>	Empena Fachada Empena e Fachada Canto
<b>D4</b> Colapso	<div>D4E</div> <div>D4F</div> <div>D4C</div> <div>D4K</div>	Empena Fachada Cobertura Canto
<b>D5</b> Ruína	<div>D5C</div> <div>D5E</div> <div>D5F</div> <div>D5P</div> <div>D5T</div>	Canto Empena Fachada Parcial Total

Dano observado				
<25 %	[25%;50%]	[50%;75%]	>75%	
D4E1	D4E2	D4E3	D4E4	
D4F1	D4F2	D4F3	D4F4	
D4C1	D4C2	D4C3	D4C4	
D4K1	D4K2	D4K3	D4K4	

Figura 4.2 – Esquema de classificação de danos em construções

#### 4.2.1 Fendilhação ligeira

A fendilhação ligeira pode ser identificada segundo várias formas, como: fendilhação vertical, horizontal, diagonal ou generalizada. A causa deste tipo de dano é essencialmente devida à direcção sísmica ser predominantemente normal à parede e o facto de as paredes não estarem travadas nessa direcção (comportamento para fora do plano). O tipo de dano representativo da fendilhação ligeira ocorre apenas no reboco. Da figura 4.3 à figura 4.5 apresenta-se esquemas de identificação dos danos sobrepondo uma imagem ilustrativa.

A figura 4.6 apresenta a frequência de danos tipo fendilhação ligeira, organizada por freguesias, sendo observadas 566 construções num universo de 2294 construções.

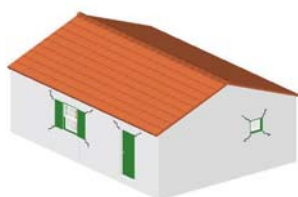


Figura 4.3 – D1EF, Fendilhação ligeira na empena e fachada



Figura 4.4 – D1F, Fendilhação ligeira na fachada



Figura 4.5 – D1E, Fendilhação ligeira na empena

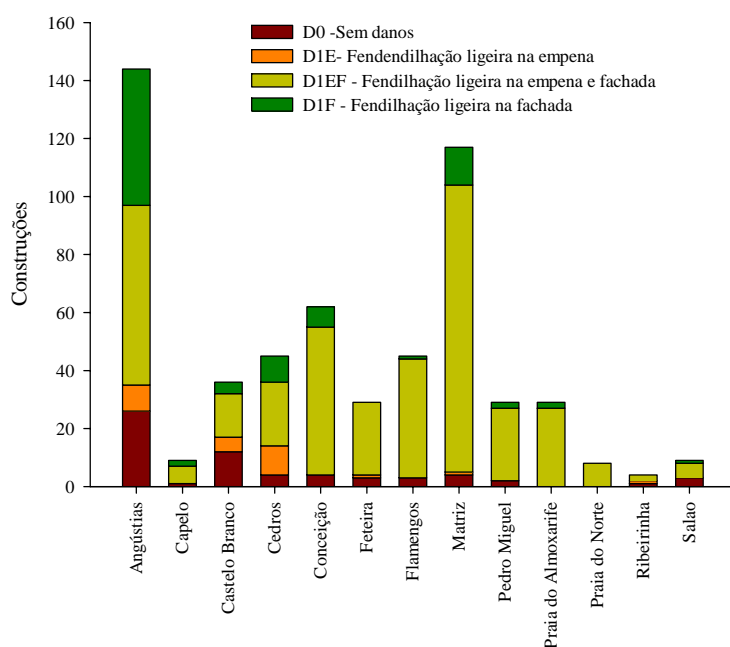


Figura 4.6 – Fendilhações ligeiras por freguesias, (universo da amostra 566/2294)

Como se pode observar na Figura 4.6 a maior parte dos casos registados de fendilhação ligeira corresponde a fendilhação simultânea em empenas e fachadas.

### 4.2.2 Fendilhação acentuada

A fendilhação acentuada apresenta o mesmo padrão referido para a fendilhação ligeira, podendo ser horizontal, vertical, diagonal ou generalizada. Pode ocorrer ligeira queda de rebocos. A fendilhação acentuada distingue-se da ligeira por apresentar uma maior área afectada e uma maior expressão. Na figura 4.7 à figura 4.9 apresenta-se um esquema de identificação dos danos utilizando-se os índices já referidos anteriormente.



Figura 4.7 – D2E, Fendilhação acentuada na empena



Figura 4.8 – D2EF, Fendilhação acentuada na empena e fachada



Figura 4.9 – D2F, Fendilhação acentuada na empena

A figura 4.10 apresenta a frequência do dano de fendilhação acentuada, organizada por freguesias. Foram observadas 482 construções com fendilhação acentuada num total de 2294 construções na ilha do Faial.

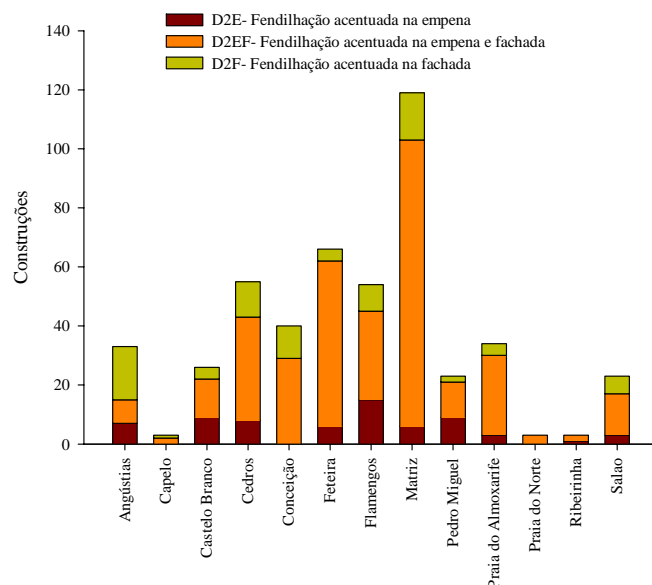


Figura 4.10 – Fendilhação acentuada por freguesias, (universo da amostra 482/2294)

Como se pode observar na figura 4.10 a maior parte dos casos registados de fendilhação acentuada corresponde a fendilhação simultânea em empenas e fachadas.

### 4.2.3 Fractura

A fractura representa um deslocamento de pedras, com movimento das pedras para fora do plano, sem colapso, geralmente associada a elevadas fendilhações e quedas de reboco, podendo ser verticais, diagonais, horizontais ou generalizadas.

As causas associadas são devidas essencialmente à direcção do movimento sísmico, podendo ter a mesma direcção da parede ou perpendicular, originando diferentes tipos de fracturas. A fractura pode ocorrer devido ao movimento do plano da parede para fora do edifício. Associa-se outro tipo de fractura ao movimento do plano da parede para dentro do edifício sendo este movimento muito pouco frequente. Na figura 4.11 à figura 4.14 estão apresentados esquemas de identificação dos danos utilizando os índices já referidos, aparecendo um novo índice (K) que corresponde ao canto do edifício.

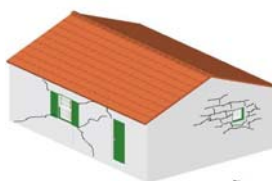


Figura 4.11 – D3EF, Fractura na empena e fachada



Figura 4.12 - D3E, fractura na empena



Figura 4.13 - D3F, fractura na fachada



Figura 4.14 - D3K, fractura no canto

A figura 4.15 apresenta a frequência do dano de fractura, organizada por freguesias. Foram observadas 620 construções com fracturas num total de 2294 construções na ilha do Faial.

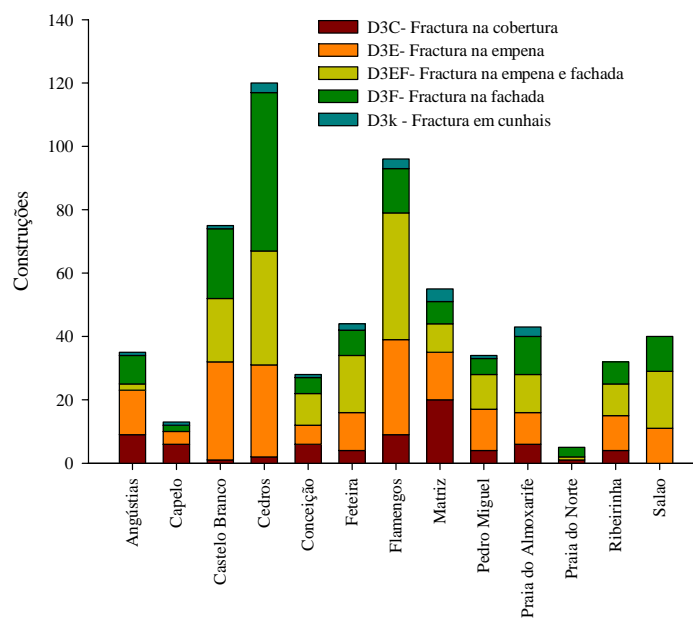


Figura 4.15 – Fracturas por freguesias, (universo da amostra 819/2294)

Como se pode observar na figura 4.15 há uma distribuição uniforme das fracturas pelos vários panos de parede.

### 4.2.4 Colapso

O colapso é caracterizado pela queda de elementos estruturais. Na representação dos vários tipos de colapso foi considerada a percentagem de área destruída do elemento em análise, dando origem aos cenários de colapso localizados por elementos como se apresenta de seguida (empena, fachada, cobertura e canto).

Foram observadas um total de 372 construções com colapsos, sendo 37 colapsos na cobertura, 203 na empena, 89 na fachada e 43 no canto, num universo de 2294 construções.

A figura 4.16 e figura 4.17 representam os danos nas coberturas, onde D4C1 refere-se a um registo de dano menor, quando comparada com D4C2.



Figura 4.16 – D4C1, Colapso da cobertura

Figura 4.17 – D4C2, Colapso da cobertura

Da figura 4.18 à figura 4.21 estão representados os danos nas empenas, respectivamente D4E1, D4E2, D4E3, D4E4 conforme o registo de dano observado.



Figura 4.18 – D4E1, Colapso da empena

Figura 4.19 – D4E2, Colapso da empena

Figura 4.20 – D4E3, Colapso da empena

Figura 4.21 – D4E4, Colapso da empena

A figura 4.22 e a figura 4.23 apresentam a frequência dos colapsos da cobertura e empena, respectivamente, organizados por freguesias.

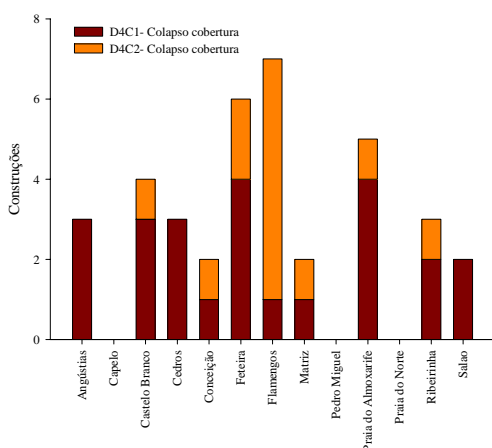


Figura 4.22 – Colapso da cobertura por freguesias, (universo da amostra 37/2294)

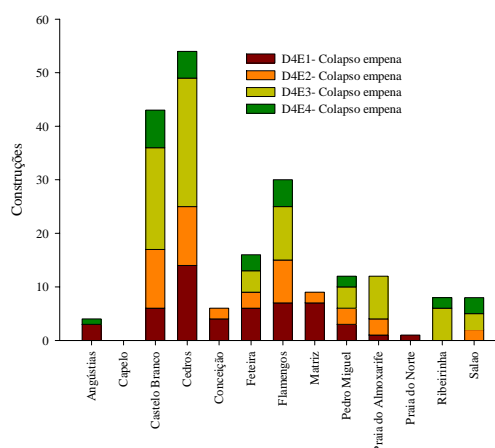


Figura 4.23 – Colapso nas empenas por freguesias, (universo da amostra 203/2294)

Na figura 4.22 pode verificar-se que em muitas freguesias não ocorreram danos exclusivamente nas coberturas e que naquelas onde se verificaram a maior parte dos danos foram do tipo C1 (ver figura 4.16).



Como se pode observar na figura 4.23 a maior parte das empenas perderam o triângulo acima do nível da cobertura (D4E3, figura 4.20) aparecendo este dano com maior percentagem nas freguesias dos Cedros, Castelo Branco e Flamengos.

Da figura 4.24 à figura 4.27 estão representados os danos nas fachadas, respectivamente D4F1, D4F2, D4F3, D4F4 conforme o registo de dano observado.



Figura 4.24 – D4F1,  
Colapso da fachada

Figura 4.25 – D4F2,  
Colapso da fachada

Figura 4.26 – D4F3,  
Colapso da fachada

Figura 4.27 – D4F4,  
Colapso da fachada

Da figura 4.28 à figura 4.31 estão representados os danos no canto, respectivamente D4K1, D4K2, D4K3, D4K4 conforme o registo de dano observado.

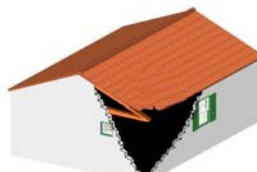


Figura 4.28 – D4K1,  
Colapso do canto

Figura 4.29 – D4K2,  
Colapso do canto

Figura 4.30 –, D4K3,  
Colapso do canto

Figura 4.31 – D4K4,  
Colapso do canto

A figura 4.32 e a figura 4.33 apresentam a distribuição dos colapsos de fachada e canto, respectivamente, organizados por freguesias.

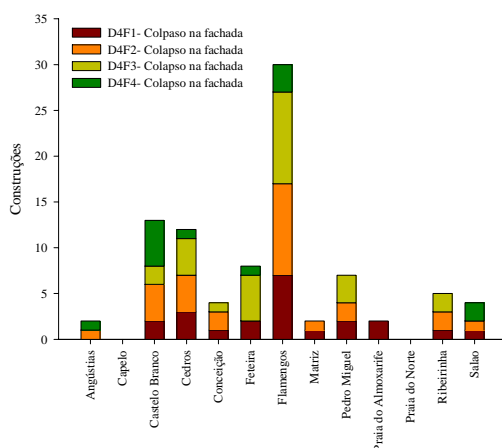


Figura 4.32 – Colapso nas fachadas por freguesia, (universo da amostra 89/2294)

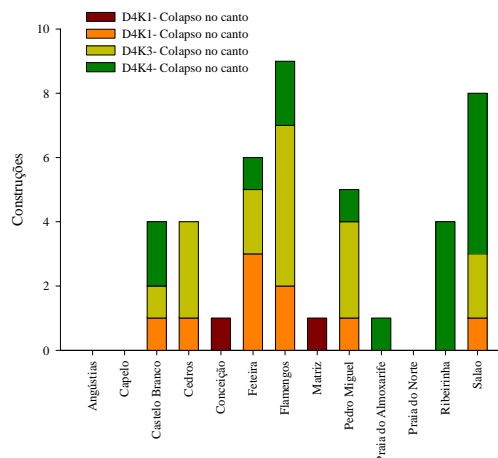


Figura 4.33 – Colapso nos cantos por freguesia, (universo da amostra 43/2294)

Como se pode observar na figura 4.32 os danos nas fachadas na sua maior parte são do tipo E2 ou E3 (figura 4.29 e figura 4.30) aparecendo este dano com maior percentagem nas freguesias dos Flamengos. Na figura 4.33 pode observar-se que em muitas freguesias não se verificou o

colapso dos cantos e que naquelas onde houve a maior parte dos danos estes foram do tipo K1, K2 e K3, com predominância nas freguesias dos Flamengos, Feteira, Pedro Miguel e Salão, sendo o dano K4 o predominante na freguesia da Ribeirinha (figura 4.31).

### 4.2.5 Ruína

A ruína representa a queda da totalidade dos elementos resistentes, geralmente associada à degradação e desmoronamento dos elementos construtivos. É comum observar o desabamento de coberturas ou o desmoronamento de empenas ou fachadas, ficando a restar apenas alguns elementos junto a janelas e portas. Desta forma foi considerado a ruína na cobertura (D5C), ruína na empena (D5E) e ruína na fachada (D5F). Dentro da classe ruína é possível desdobrar em ruína parcial (D5P) quando apenas uma parte ficou em ruína e em ruína total (D5T) quando o edifício não apresenta nenhum elemento resistente a exercer a sua função. Os índices referidos anteriormente podem ser visualizados da figura 4.34 à figura 4.36.



Figura 4.34 – D5C, Ruína na cobertura



Figura 4.35 – D5E, Ruína na empena



Figura 4.36 – D5F, Ruína na fachada

A figura 4.37 apresenta a distribuição das ruínas, organizados por freguesias, num total de 354 construções de um universo de 2294, observadas na ilha do Faial.

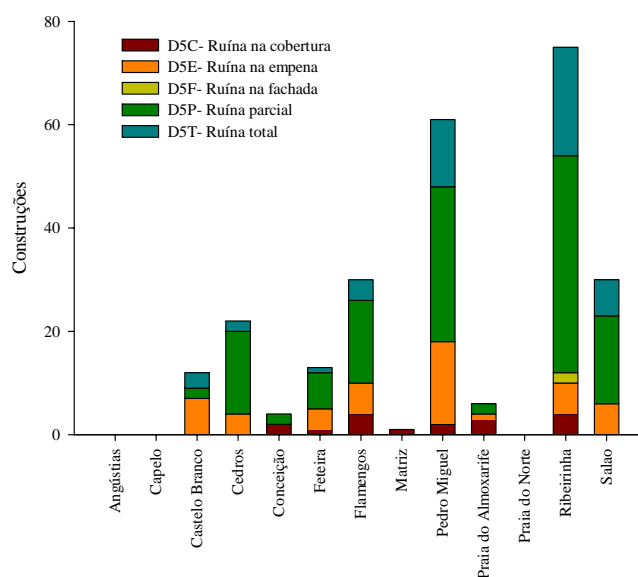


Figura 4.37 – Ruínas por freguesias, (universo da amostra 254/2294)

Como se pode observar na figura 4.37 algumas freguesias não apresentam ruínas e, naquelas em que estas se verificaram (nas freguesias da Ribeirinha, Pedro Miguel, Salão, Flamengos, Cedros e Castelo Branco), a maior parte corresponde à ruína total ou parcial.

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS INTERIORES

Assim como nos danos exteriores a classificação de danos interiores foi baseada na observação de fotografias de todo o parque habitacional. Embora neste caso o número de fotografias foi menor comparativamente com as usadas para a classificação dos danos exteriores. Na análise das fotografias encontraram-se padrões que dependem da localização das construções e que permitiram concluir sobre a intensidade e a direcção do sismo. Esta identificação de padrões é sempre discutível e subjectiva, neste caso procurou-se a partir da análise das fotografias identificar os diversos tipos de danos ocorridos, procurando-se enquadrá-los dentro de uma classificação que engloba 5 categorias, divididas da seguinte forma, seguindo o modelo de classificação dos danos exteriores: fendilhação ligeira; fendilhação acentuada; fractura, colapso e ruína. A definição de

cada uma destas classificações será efectuada nos parágrafos seguintes. Os dados seguintes são referentes a um universo de 2293 construções observadas na ilha do Faial.

### 4.3.1 Fendilhação ligeira

Neste tipo de dano pretende-se representar ligeiras fissuras nos rebocos ou no revestimento dos elementos interiores dos edifícios. Sendo as fendilhações nas paredes designadas por D1P e as fendilhações nos tectos por D1T. As fendilhações ligeiras podem ser identificadas de várias formas relativamente ao tipo de acção a que o elemento esteve sujeito. Na figura 4.38 e na figura 4.39 apresenta-se um esquema de identificação dos danos, onde (D) representa o dano, (1)-fendilhação ligeira, (P)-paredes e (T)-tecto, respectivamente.



Figura 4.38 – Fendilhação ligeira paredes

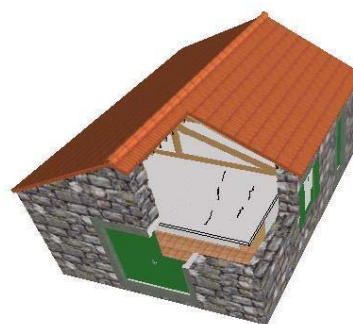


Figura 4.39 – Fendilhação ligeira D1T

A figura 4.40 apresenta a frequência da fendilhação ligeira observada em 489 construções num universo de 2293, em freguesias na ilha do Faia.

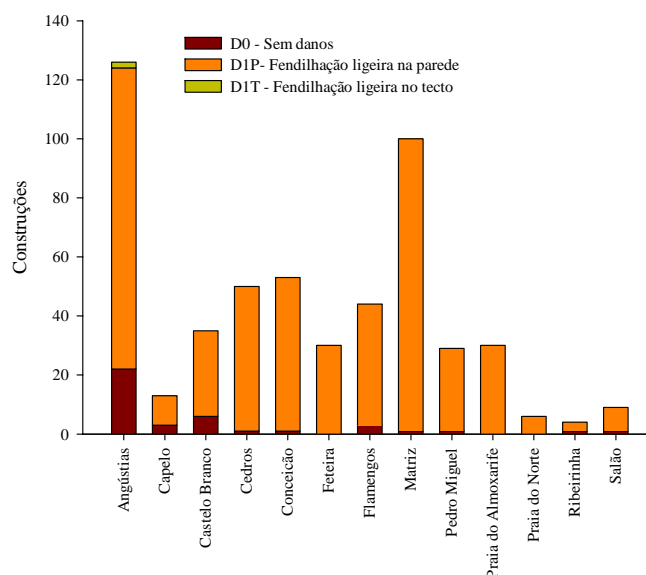


Figura 4.40 – Fendilhação leve por freguesias, (universo da amostra 489/2293)

Como se pode observar na figura 4.40 a maior parte dos danos registados corresponde a fendilhação em paredes.

### 4.3.2 Fendilhação Acentuada

A fendilhação acentuada apresenta o mesmo comportamento relativamente à fendilhação leve, podendo ser horizontal, vertical, diagonal ou generalizada. Contudo diverge da fendilhação leve pelo facto de abranger uma maior área afectada e está geralmente associada à queda de rebocos. Na figura 4.41 e figura 4.42 apresentam-se dois esquemas de identificação dos danos.

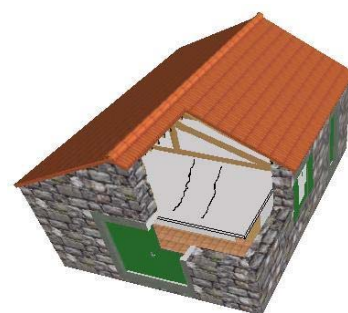


Figura 4.41 – Fendilhação acentuada paredes, D2P

Figura 4.42 – Fendilhação acentuada tectos, D2T

A figura 4.43 apresenta a frequência da fendilhação acentuada, organizada por freguesias, num total de 525 construções para um universo de 2293.

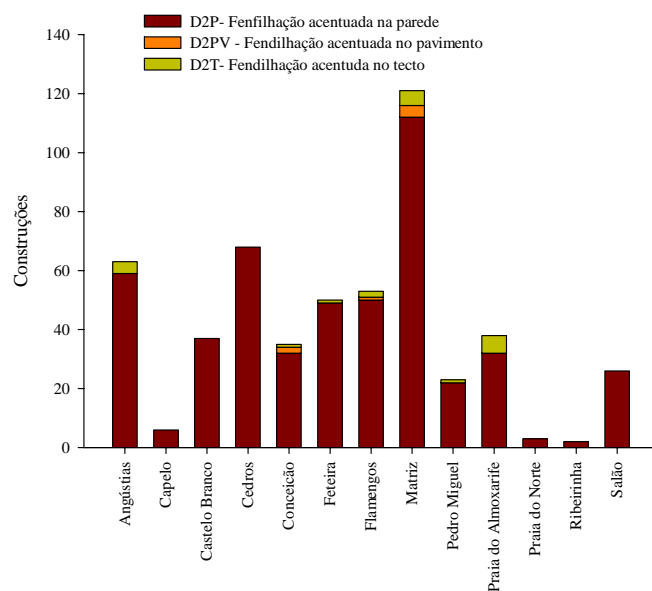


Figura 4.43 – Fendilhação acentuada por freguesias, (universo da amostra 525/2293)



Como se pode observar na figura 4.43 a maior parte dos danos registados corresponde a fendilhação em paredes.

### 4.3.3 Fracturas

Da mesma forma que se definiu para os danos exteriores, a fractura representa um deslocamento de paredes interiores sem colapso, geralmente associada a elevadas fendilhações e quedas de reboco, podendo ser verticais, diagonais, horizontais ou generalizadas. É comum verificar o desalinhamento das paredes divisórias, o desnivelamento dos pavimentos e tectos. Muitos dos edifícios urbanos não apresentaram danos exteriores, no entanto, observa-se em alguns edifícios o movimento da fachada principal para o exterior, ficando um afastamento entre as paredes divisórias e a fachada principal. Para caracterizar este dano foi atribuído o nome de fractura de rotação. Assim temos fractura das paredes (D3P), fractura dos tectos (D3T), fracturas dos pavimentos (D3PV) e fractura de rotação (D3R). As fracturas dos pavimentos são mais evidenciadas nos edifícios onde o piso térreo tenha um revestimento rígido, tornando-se difícil avaliar os danos em grande parte do parque habitacional visto este ser caracterizado por pavimentos em madeira. Da figura 4.44 à figura 4.46 apresentam-se esquemas de identificação de fracturas em paredes, pavimentos e tectos utilizando-se os índices já referidos na classificação dos danos interiores.



Figura 4.44 – Fractura das paredes, D3P



Figura 4.45 – Fractura do pavimento, D3PV

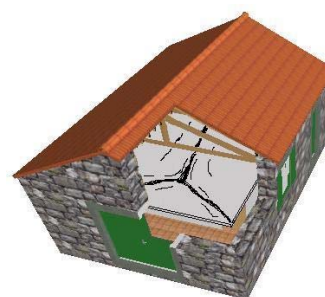


Figura 4.46 – Fracturas interiores por freguesias, D3T



A figura 4.47 apresenta a frequência dos danos organizada por freguesias, referentes a fracturas onde se observaram em 704 construções num total de 2293 na ilha do Faial.

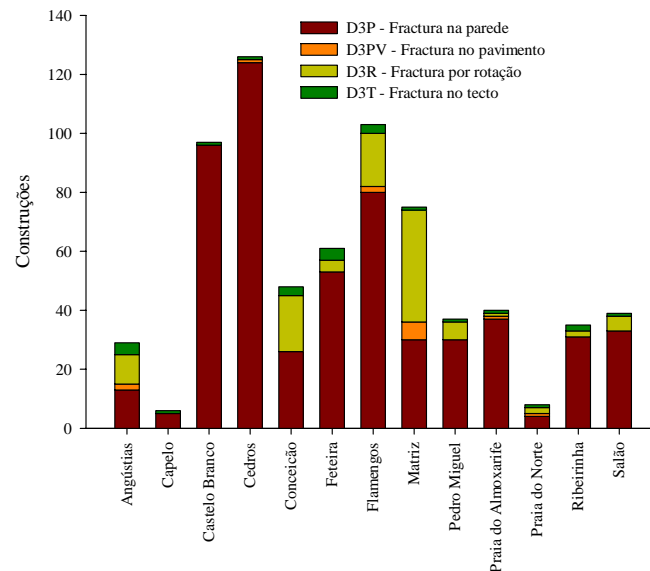


Figura 4.47 – Fracturas interiores por freguesias, (universo da amostra 704/2293)

Como se pode observar na figura 4.47 a maior parte dos danos registados corresponde a fracturas em paredes, registando-se também várias fracturas de rotação em várias freguesias.

#### 4.3.4 Colapso

O colapso é caracterizado essencialmente pela queda dos elementos construtivos interiores. Neste dano apenas é considerado o colapso do tecto (D4T) e colapso das paredes (D4P), figura 4.48 e figura 4.49, respectivamente.

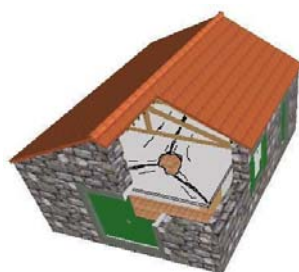


Figura 4.48 – Colapso dos tectos, D4T

Figura 4.49 – Colapso das paredes, D4P

A figura 4.50 apresenta a frequência dos colapsos de empena e cobertura, organizados por freguesias, tendo-se observado 289 construções num universo de 2293 na ilha do Faial.

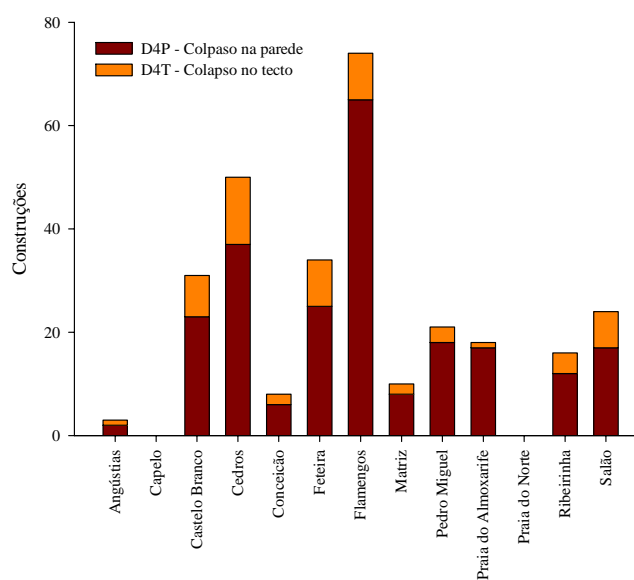


Figura 4.50 – Colapso interior por freguesias, (universo da amostra 289/2293)

Como se pode observar na figura 4.50 a maior parte dos danos registados corresponde a colapsos em paredes.

### 4.3.5 Ruína

A ruína representa a queda na totalidade dos elementos construtivos interiores. Observa-se que no desabamento de coberturas ou desmoronamento de empenas e fachadas, estes contribuem para danificar os elementos interiores (figura 4.50 e figura 4.51). Porém a identificação dos danos interiores torna-se difícil pois os elementos construtivos têm comportamentos diferentes em função do tipo de material. Sendo o tabique o tipo de parede interior mais comum, devido ao seu reduzido peso e boa capacidade de suportar cargas distribuídas (piso e tectos), considera-se como ruína quando deixa de exercer as funções para que foi construído. Já nas paredes de blocos de cimento facilmente se identifica o tipo de dano. Neste tipo de dano considera-se ruína nas paredes (D5P) e ruínas nos tectos (D5T).



Figura 4.51 – Edifício em ruína (paredes interiores)



Figura 4.52 – Edifício em ruína (tectos)

A figura 4.53 apresenta a frequência das ruínas interiores, organizados por freguesias, num total de 246 construções de um universo de 2293.

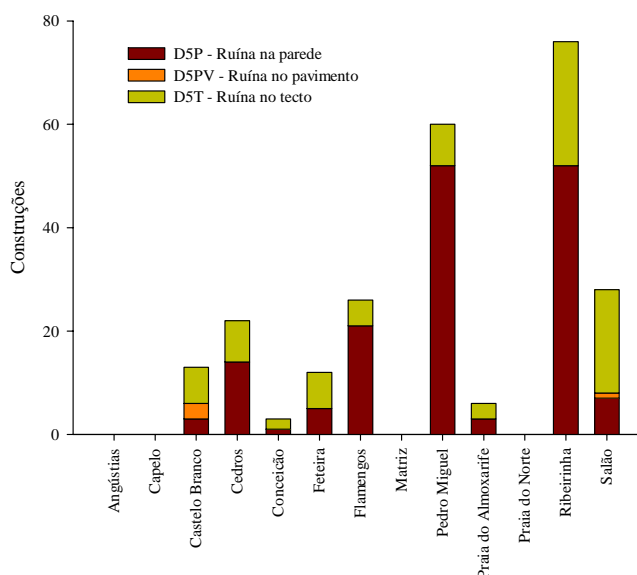


Figura 4.53 – Ruínas interiores por freguesias, (universo da amostra 246/2293)

Como se pode observar na figura 4.53 a maior parte dos danos registados corresponde a ruína nas paredes, à imagem do elevado número de colapsos verificado na figura anterior.

#### 4.4 ANÁLISE DOS DANOS OBSERVADOS

A informação disponível na base de dados permite cruzar simultânea os dados sobre os tipos estruturais descritos em [Costa *et al.*, 2008b] e sobre os danos ocorridos, obtendo resultados de bastante interesse. As figuras apresentam uma frequência dos danos de forma genérica por tipo construtivo descrito no capítulo 3. De forma a simplificar alguns gráficos são apresentados os danos divididos apenas nas 5 categorias já referidas: fendilhação ligeira (D1); fendilhação acentuada (D2); fractura (D3), colapso (D4) e ruína (D5) em função dos seguintes tipos construtivos: construção tradicional (CT), construção tradicional alterada (CTA), construção mista (CM1, CM2 e CM3) e construção corrente (CC) (ver capítulo 3).

#### 4.4.1 Danos Exteriores

A figura 4.54 representa os danos exteriores para a ilha do Faial, os danos são apresentados de forma agrupada pelos índices de fendilhação ligeira, fendilhação acentuada, fractura, colapso e ruína, referindo o respectivo sistema construtivo.

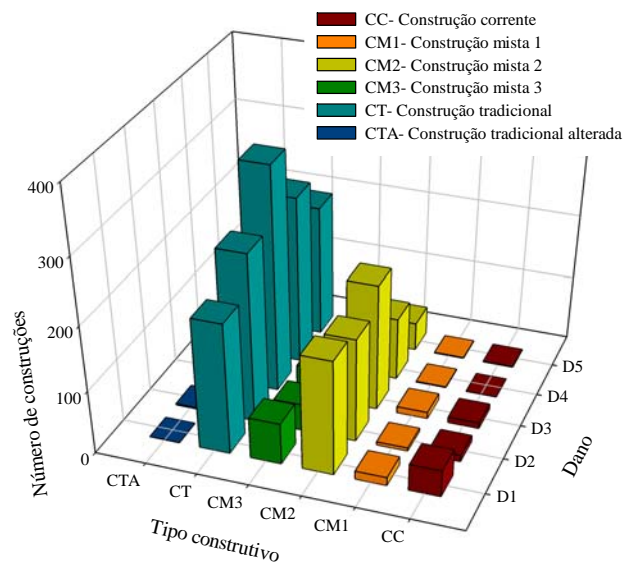


Figura 4.54 – Relação dos danos com o tipo construtivo, na ilha do Faial,  
(universo da amostra 2246)

Na figura 4.55 mostra-se D1 e D2 observados na ilha do Faial, podendo constatar que a construção tradicional é aquela que apresenta maiores danos. Aliás deve desde já realçar-se que esta situação se verifica na generalidade dos casos. Ao cruzar as informações de danos observados com o tipo construtivo o universo é de 2246 construções.

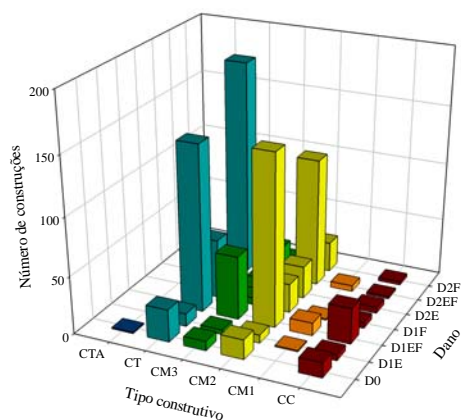


Figura 4.55 – Relação dos danos (D1 e D2) com o tipo construtivo, (universo da amostra 990/2246)

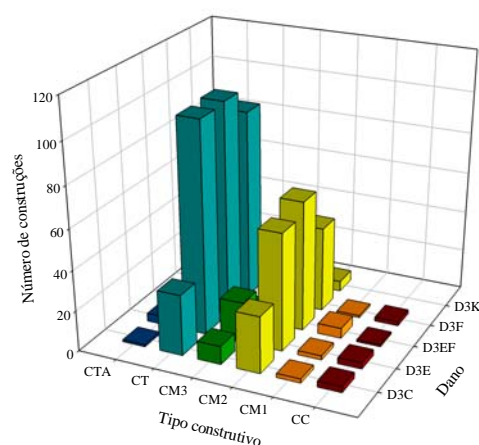


Figura 4.56 – Relação dos danos (D3) com o tipo construtivo, (universo da amostra 623/2246)

Na figura 4.56 pode verificar-se que a distribuição de danos do tipo D3 na construção tradicional, sendo neste caso o dano D3EF (fractura simultânea na empena e na fachada) que apresenta um maior número de casos. Nessa figura também é possível constatar que a construção mista do tipo 2 (CM2) apresenta também um número elevado de danos do tipo D3. Situação semelhante surge na figura 4.57 para os resultados relativos ao dano D4 (colapso).

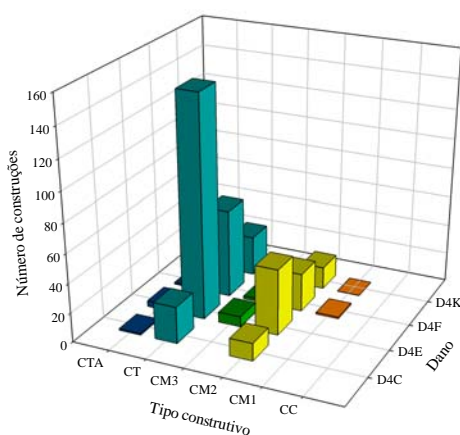


Figura 4.57 – Relação dos danos (D4) com o tipo de sistema construtivo, (universo da amostra 277/2246)

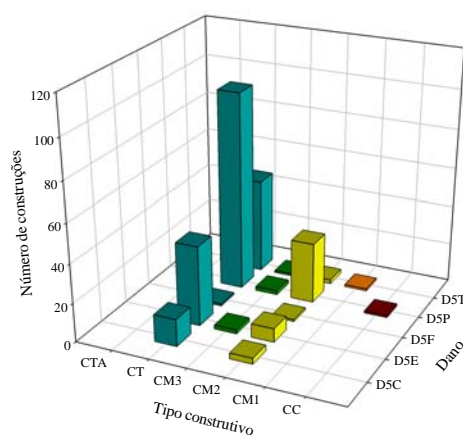


Figura 4.58 – Relação dos danos (D5) com o tipo de sistema construtivo, (universo da amostra 256/2246)

A figura 4.58 indica que os elementos estruturais verticais mais vulneráveis em alvenaria de pedra, são as empenas. Em contrapartida, a ruína nas fachadas raramente é o dano mais significativo. A maioria dos registos de ruína em construção tradicional, são referentes à ruína parcial. Foram observados pouco registos de ruína em construção tradicional (CT), em construção mista 1 (CM1) e em construção corrente (CC).

A figura 4.59 representa os danos frequentes na ilha do Faial pelos seus elementos construtivos (empena, fachada, cobertura e canto) em relação ao sistema construtivo.

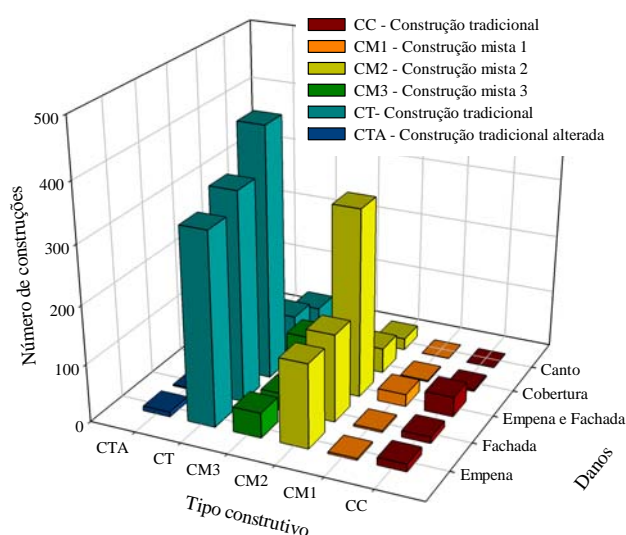


Figura 4.59 – Relação dos danos localizados com o tipo de sistema construtivo,  
(universo da amostra 2933)

#### 4.4.2 Danos Interiores

Na figura 4.60 apresenta-se a frequência dos danos interiores referindo-se à fendilhação ligeira, fendilhação acentuada, fractura, colapso, ruína como também se referem os edifícios sem danos (D0, D1, D2, D3, D4 e D5) em função do tipo construtivo, podendo verificar-se que a construção tradicional é aquela que apresenta maiores danos, logo seguida pela construção mista CM2. Aliás deve-se desde já realçar que a situação “CT/maiores danos” se verifica na generalidade dos casos.

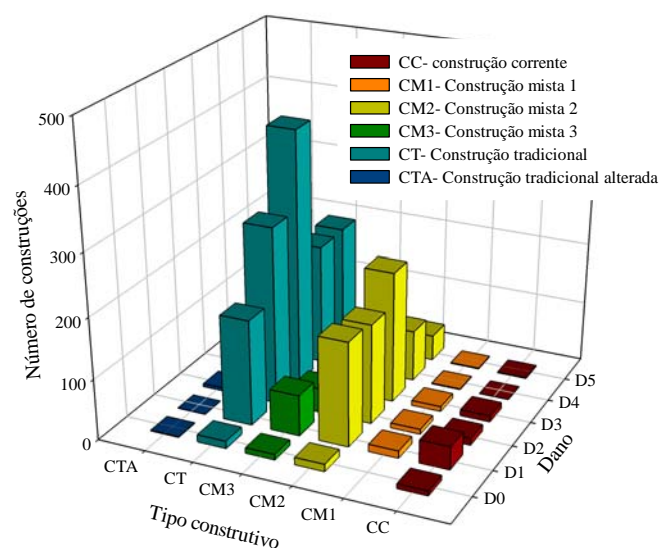


Figura 4.60 – Relação do tipo de construção com os danos interiores, (universo da amostra 2221)

Na Figura 4.61 apresenta-se a distribuição dos danos interiores localizados em paredes, tectos e pavimentos em função do tipo construtivo.

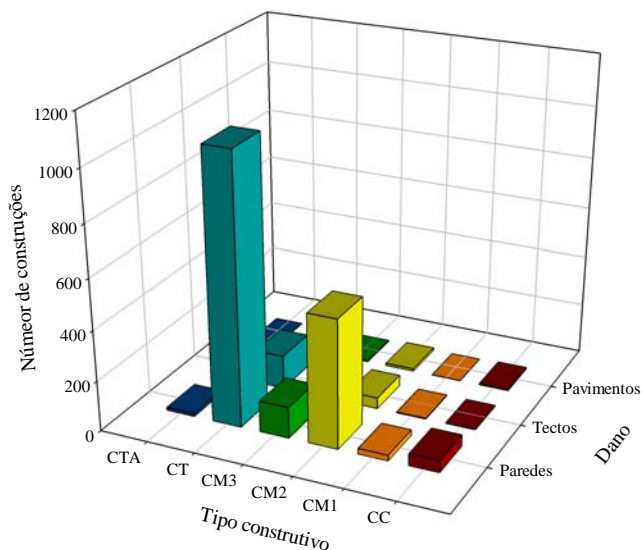


Figura 4.61 – Relação do tipo construtivo com os danos interiores localizados, (universo da amostra 1977)



Na Figura 4.61 apresenta-se a frequência dos danos interiores localizados (paredes, tectos e pavimentos) em função do tipo construtivo podendo verificar-se que a construção tradicional é aquela que apresenta maiores danos nas paredes.

#### 4.5 CONVERSÃO PARA EMS-98

A presente classificação de danos pode ser relacionada com outras classificações, nomeadamente a escala EMS 98 desenvolvida por [Grunthal, 1998]. A conversão da presente proposta de danos para outras escalas permite relacionar os danos e aplicar metodologias cujos dados de entrada sejam os da EMS 98. Esta conversão apresenta vantagens na medida em que faculta a comparação de resultados de diferentes metodologias. A conversão teve como base fundamentalmente a comparação de registos fotográficos de ambas as escalas, contudo alerta-se para a dificuldade de atribuir directamente uma determinada classe, pois existe sempre alguma subjectividade na escolha das classes. Na tabela 4.1 apresenta-se a relação entre os danos observados e a escala EMS 98.

Tabela 4.1 – Conversão dos danos observados na escala EMS\_98, [Grunthal, 1998]

Danos observados	Escala EMS 98	Danos observados	Escala EMS 98
D0	D1	D4E3	D4
D1E	D1	D4F3	D4
D1F	D1	D4K3	D4
D1EF	D1	D4K4	D4
D2E	D1	D4C3	D4
D2F	D1	D4C4	D4
D2EF	D2	D4E4	D5
D3E	D2	D4F4	D5
D3F	D2	D5E	D5
D3C	D2	D5C	D5
D3EF	D3	D5T	D5
D3K	D3	D5F	D5
D4E1	D3	D5P	D5
D4E2	D3		
D4F1	D3		
D4F2	D3		
D4K1	D3		
D4K2	D3		
D4C1	D3		
D4C2	D3		

Na figura 4.62 estão representados alguns registos fotográficos que serviram de base para a conversão da classe de danos proposta na classe de danos EMS 98 [Grunthal, 1998].

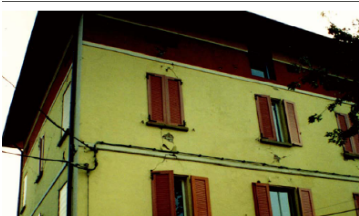







Classe dano EMS 98	Escala EMS 98	Danos observados
D2		
D3		
D4		
D5		

Figura 4.62 – Comparação dos registos fotográficos, danos observados/EMS-98

#### **4.6 DISCUSSÃO DO LEVANTAMENTO E DA CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA**

Neste capítulo é proposta uma nova classificação de danos nas envolventes exteriores e no interior para as alvenarias tradicionais dos Açores mais consentânea com o comportamento observado. De forma a poder relacionar com outros trabalhos e validar metodologias é efectuada uma relação com outra classificação [Grunthal, 1998].

Da análise de alguns dos resultados tratados pode-se concluir que a maioria dos danos se verificaram nos edifícios de construção tradicional e que a distribuição de danos, variável de freguesia para freguesia, se restringe a uma área envolvente à zona do epicentro do sismo (Ribeirinha, Espalhafatos, Salão, Pedro Miguel, Cedros e Flamengos) aparecendo casos esporádicos mais afastados como seja o caso da freguesia de Castelo Branco.

## ***CAPÍTULO 5***

### **5 AVALIAÇÃO DO RISCO SÍSMICO**

#### **5.1 CONCEITO DO RISCO SÍSMICO**

Entende-se como risco sísmico o resultado duma avaliação integrada da influência conjunta de três factores (ver figura 5.1): a casualidade, a vulnerabilidade e a exposição. Para classificar a casualidade é fundamental o conhecimento geológico e as características dos solos. A vulnerabilidade classifica o grau e a extensão dos danos nos elementos expostos sob uma acção sísmica. Por fim, a exposição refere-se ao valor dos elementos e a sua distribuição geográfica. Tendo em conta esta abordagem para definir o risco sísmico, a vulnerabilidade do edificado é das três variáveis a que assume a maior importância pelas óbvias consequências num evento sísmico. Por outro lado, através de um conhecimento de engenharia sísmica é possível intervir, melhorar e até controlar o comportamento sísmico dos edifícios, reduzindo o nível de vulnerabilidade e consequentemente o nível de dano físico, económico e perdas de vidas. Para minimizar os efeitos destes fenómenos catastróficos têm sido desenvolvidos inúmeros esforços de forma a reduzir o risco sísmico [JRC, 2007].

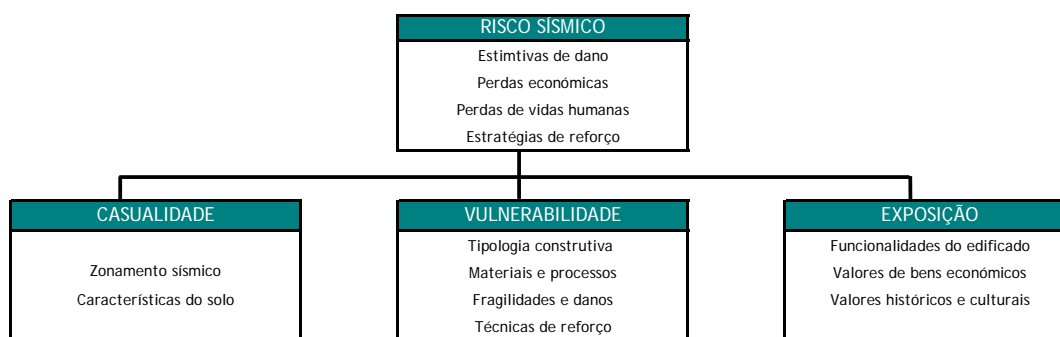


Figura 5.1 – Esquema dos aspectos a considerar na avaliação do risco sísmico.

O conceito e definição do risco sísmico foram inicialmente introduzidos em 1979 pela *United Nations Disaster Relief Office* (UNDRO), conduzindo à expressão 5.1 reconhecida internacionalmente.

$$R_l = \sum_m q_m \left( \sum_i H_i V_{lim} \right) \quad (5.1)$$

De acordo com UNDRO,  $(R_l)$  representa a probabilidade de dano, para um determinado período de tempo para uma dada população, considerando a probabilidade sísmica do local. A exposição representada por  $(q_m)$ , reflecte o valor dos elementos expostos ao risco para uma dada categoria, onde  $(i)$  representa a intensidade do evento sísmico e  $(l)$  o nível de dano. A casualidade  $(H_i)$  representa a probabilidade de excedência de um determinado nível de intensidade  $(i)$  do fenómeno natural (sismos), num local e período de tempo de exposição especificados. A vulnerabilidade  $(V)$  é a capacidade de um determinado elemento resistir ou ser afectado do evento em causa.. A interpretação do processo da avaliação probabilística do risco sísmico, é apresentada de forma elucidativa no trabalho de [Costa, 2004], onde esquematiza a relação entre os vários factores de avaliação do risco sísmico.

## 5.2 CASUALIDADE

A casualidade é um dos factores de avaliação do risco sísmico, o qual, está directamente associado ao evento sísmico. É definida pela probabilidade de ocorrência de um evento sísmico e

pelas suas características. Assim, a casualidade está associada ao zonamento sísmico, tipo e características do solo, intensidade, profundidade e frequência sísmica, ou seja, a acção sísmica a que uma determinada zona está sujeita. De modo, a estudar a casualidade estão actualmente estabelecidas duas abordagens. Uma abordagem mais individualista, que analisa cada fonte sísmica separadamente, abordagem determinista. A abordagem probabilística combina uma série de contribuições da fonte sísmica. Por exemplo, numa determinada zona (cidade) um sismo pode não ter um efeito homogéneo, mas sim efeitos diferentes consoante as características do solo dessa mesma zona.

### **5.2.1 Caracterização geológica da ilha do Faial**

O conhecimento da caracterização geologia dos tipos de terreno, adjacentes às fundações dos edifícios, é de extrema importância para a avaliação do risco sísmico, nomeadamente na quantificação das respostas dos edifícios face às acções sísmicas. Na figura 5.2 representa-se a classificação dos solos da ilha do Faial, obtida por trabalhos desenvolvidos por [Nunes *et al.*, 2001] no âmbito do Risco sísmico do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, na caracterização das formações geológicas superficiais.

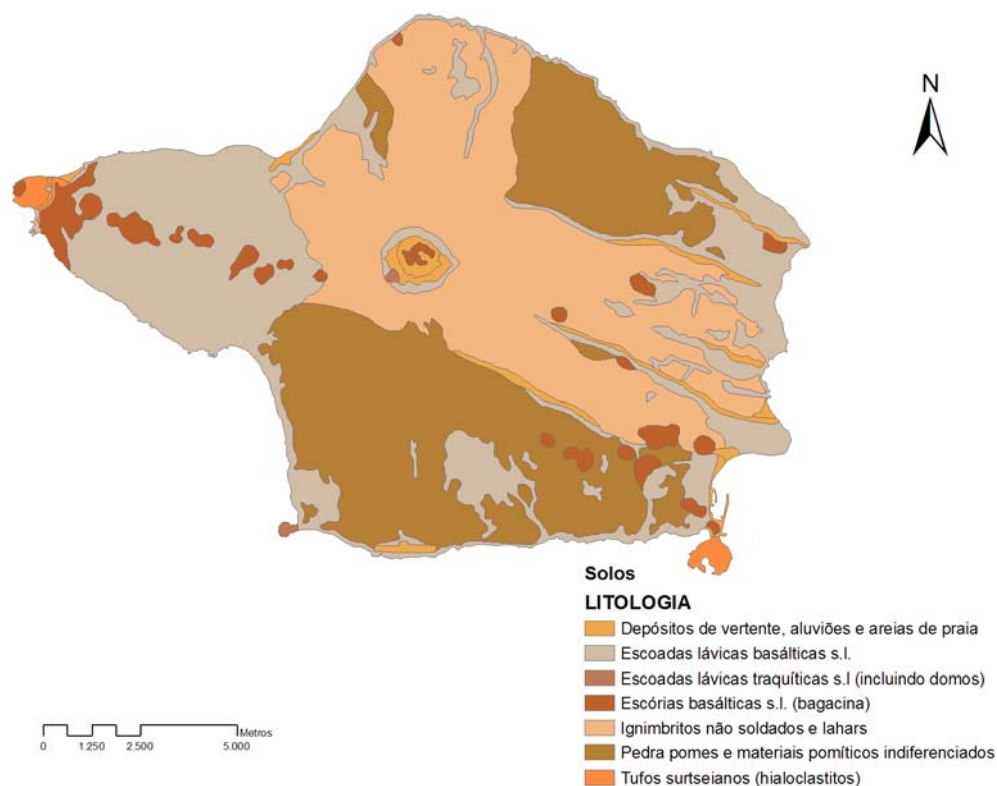


Figura 5.2 – Carta de solos da ilha do Faial, [Nunes *et al.*, 2001]

Para definir as acções sísmicas associadas ao dimensionamento e análise de estruturas segundo o EC8 [CEN, 2004] foram realizados trabalhos [LREC, 2006] com o objectivo de alargar o conhecimento das condições geológicas e geotécnicas dos terrenos. Estes trabalhos tiveram como base ensaios SPT –*Standard Penetration Test*, caracterizando a velocidade de propagação ( $V_p$ ) das ondas de corte dos materiais. Com base nos valores das velocidades de propagação das ondas de corte estabelece-se a correspondência entre os materiais e os perfis estratigráficos tipo, relacionando com o tipo de terreno segundo o EC8 [CEN, 2004] que servem de base à definição da configuração dos espectros de resposta elásticos.

Na Tabela 5.1 apresenta-se a relação do tipo de material com o tipo de terreno segundo o anexo nacional EN1998-1 NA [CT115, 2008].

Tabela 5.1 - Correspondência entre os materiais vulcânicos e o tipo de terreno, EC8 [CEN, 2004]

Materiais Vulcânicos	Tipo de terreno EC8
Escoadas lávicas basálticas s.l.	B
Escoadas lávicas traquíticas s.l (incluindo domos)	B
Tufos surtseianos (hialoclastitos)	B
Depósitos de vertente, aluviões e areias de praia	C
Escórias basálticas s.l. (bagacina)	C
Pedra pomes e materiais pomíticos indiferenciados	C
Ignimbritos não soldados e lahars	C

### 5.3 EXPOSIÇÃO

A exposição está essencialmente relacionada com os custos indirectos de um possível evento sísmico. Custos que podem ser traduzidos em termos económicos, sociais, culturais e materiais. Este factor pode depender essencialmente das funcionalidades do edifício, nomeadamente a localização, acessibilidade, nível e tipo de ocupação, função do edificado. Assim, é essencial a criação de um critério de classificação dos edifícios consoante as suas características, de modo a ser possível e mais fácil actuar de modo eficaz. Por exemplo, zonas de elevado interesse cultural e comercial apresentam uma exposição elevada, ao contrário de locais de reduzida actividade cultural e comercial que apresentam um nível reduzido de exposição. É bastante oneroso e difícil prevenir e actuar na exposição sendo apenas possível actuar em campanhas de sensibilização e educação da população. Como é o exemplo de trabalhos desenvolvidos recentemente por [Paupério *et al.*, 2008].

### 5.4 VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade de edifícios, está estritamente relacionada com a sua estrutura e características, nomeadamente; tipologia, número de pisos, elementos construtivos, dimensões, existência de reforços sísmicos, etc. Assim, numa análise da vulnerabilidade é necessário ter em consideração tanto os aspectos qualitativos como quantitativos, de modo a estimar a probabilidade de um edifício se danificar na ocorrência de um sismo. O grande objectivo da análise da vulnerabilidade consiste em definir modelos que correlacionem a severidade do sismo com os seus efeitos, tendo em consideração o impacto de um sismo numa determinada área. De uma forma geral a vulnerabilidade pode ser identificada conforme o seu nível estrutural, não-estrutural e funcional, a figura 5.3 explica cada um dos níveis.



Níveis de vulnerabilidade		
Estrutural	Não-estrutural	Funcional
Susceptibilidade do sistema construtivo sofrer um determinado dano	Susceptibilidade de elementos arquitectónicos sofrer um determinado dano (ex: tubagens, instalações)	Perturbação ao funcionamento do edifício, está dependente da avaliação estrutural e não-estrutural (ex: planos de emergência)

Figura 5.3- Níveis de vulnerabilidade

De forma a entender melhor o conceito de vulnerabilidade associado a cada tipo de estrutura, está representado na figura 5.3 a classificação de tipos de estruturas segundo 6 classes de vulnerabilidade, sendo a classe (A) representativa de maior vulnerabilidade e a classe (F) de menor. Estas classes são definidas em função dos materiais dos sistemas construtivos e do nível de concepção sísmo-resistente das estruturas. Esta classificação designada por EMS-98 [Grunthal, 1998] permite perceber a diferença relativa entre a vulnerabilidade dos diferentes tipos de estrutura, como por exemplo as construções de alvenaria de pedra (classe A, B e C) e as construções em betão armado (classe C, D e E).

Esta classificação apresenta de forma qualitativa a classe de vulnerabilidade de vários tipos de estruturas, contudo por ter uma elevada abrangência não aborda características importantes dos edifícios. Por exemplo, não considera as ligações entre os vários elementos estruturais, dando origem a discussões na atribuição da classe de vulnerabilidade. É o caso das estruturas de alvenaria com pavimento de betão armado cujo valor da vulnerabilidade é menor que nas estruturas de alvenaria de pedra aparelhada.

TIPO DE ESTRUTURA		Classe de Vulnerabilidade					
		A	B	C	D	E	F
ALVENARIA	Alvenaria de pedra irregular e solta	○					
	Adobe	○	—				
	Alvenaria de pedra (aparelhada)	—	○				
	Alvenaria de pedra aparelhada (silhares)		—	○	—		
	Alvenaria de blocos de betão ou tijolo (não reforçada)	—	○	—			
	Alvenaria com pavimentos em betão armado		—	○	—		
	Alvenaria reforçada/Alvenaria confinada			—	○	—	
BETÃO ARMADO	Estrutura porticada em betão armado sem CSR ou com CSR mínimo <sup>1</sup>	—	—	○	—		
	Estrutura porticada em betão armado com CSR moderado		—	—	○	—	
	Estrutura porticada em betão armado com CSR elevado			—	—	○	—
	Estrutura de paredes em betão sem CSR ou com CSR mínimo	—	○	—			
	Estrutura de paredes em betão armado com CSR moderado		—	○	—		
	Estrutura de paredes em betão armado com CSR elevado			—	○	—	
METÁLICA	Estrutura metálica		—	—	○	—	
MADEIRA	Estrutura de madeira		—	—	○	—	

<sup>1</sup>CSR – Conceção sísmo-resistente  
○ classe mais provável    — — — — — margem para classe menos provável    — — — — — margem de classe provável

Figura 5.4- Definição das classes de vulnerabilidade segundo a escala EMS-98

De referir que a metodologia aplicada na presente dissertação é vocacionada para estruturas de alvenaria de pedra, não sendo avaliadas as estruturas de betão armado segundo esta metodologia.

#### 5.4.1 Classificação das metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica

Actualmente a classificação de metodologias de avaliação da vulnerabilidade é alvo de abordagens distintas e podem ser encontradas várias propostas de diversos autores. A escolha adequada da metodologia para avaliar a vulnerabilidade de uma determinada área ou região é de extrema importância, na medida em que devem ser tomadas considerações relativas ao número de construções, principalmente ao factor escala da área em análise. Por outro lado, a metodologia deve ser apropriada à natureza, função e tipologia construtiva, como por exemplo ser sensível à distinção entre edifícios de cariz industrial, monumentos, igrejas, etc. Por fim o tempo necessário para elaborar uma avaliação da vulnerabilidade deve ser adaptado em função dos recursos humanos e económicos, tendo em consideração o nível de rigor pretendido.

Um grande número de classificações de metodologias existentes na bibliografia podem ser encontradas de forma organizada em trabalhos como [Vicente, 2008] e [Sousa, 2006]. De seguida são apresentadas de forma sucinta algumas classificações.

Projectos recentemente desenvolvidos [Project, 2004; LessLoss, 2007], onde participaram vários grupos de investigação de universidades e laboratórios europeus, cujo objectivo principal se enquadra no âmbito da mitigação do risco sísmico e avaliação de perdas, atribuíram categorias para avaliar as metodologias. Assim, as metodologias de avaliação da vulnerabilidade podem ser agrupadas em categorias (3 níveis) de acordo com o seu nível de detalhe, conforme se pode ver na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Classificação do nível de avaliação vulnerabilidade

Classificação do nível de vulnerabilidade ( <i>level approach</i> )	
Nível I (First)	Informação qualitativa, apropriada para centros urbanos
Nível II (Second)	Modelos mecânicos, informação de melhor qualidade, informação geometrica rigorosa
Nível III (Third)	Modelação numérica rigorosa, inspecção e caracterização da construção

Das propostas existentes na bibliografia, aquela que reúne o maior consenso é a atribuída por [Corsanego *et al.*, 1990], que apresenta quatro grandes grupos, como podemos ver na figura 5.5.

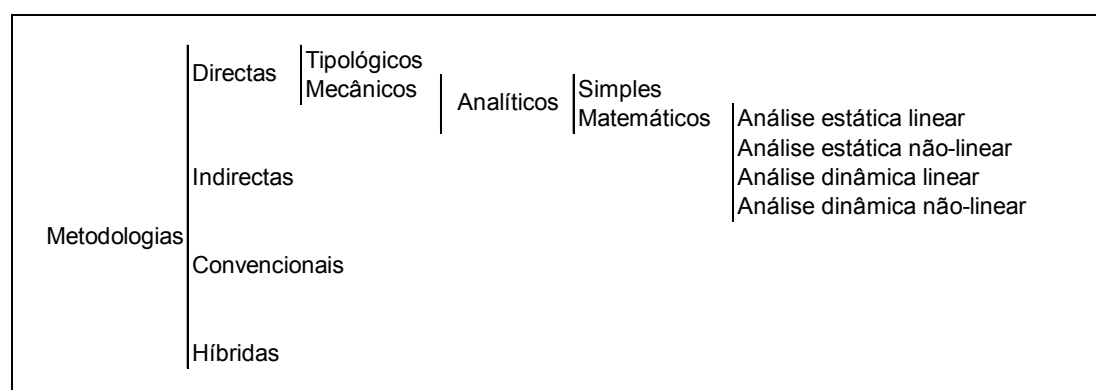


Figura 5.5- Classificação dos procedimentos das metodologias segundo [Corsanego *et al.*, 1990]

O primeiro grupo define as técnicas directas como uma forma de estimar directamente o dano através de métodos mecânicos ou tipológicos. Os métodos mecânicos baseiam-se na comparação entre as exigências do sismo expresso em termos de ADRS (espectro de resposta de aceleração e deslocamento) e a capacidade resistente da estrutura. Nesta metodologia a capacidade estrutural está definida através de uma curva de força deslocamento obtida incrementalmente até se atingir um estado último de comportamento. Esta curva corresponde à transformação da curva da estrutura original para uma curva de um sistema com um grau de liberdade equivalente à representada no sistema original. Em construções de alvenaria de pedra, a aplicação deste método necessita de uma calibração prévia com base em resultados experimentais disponíveis. Os métodos tipológicos são baseados em danos observados pós-sismo, onde se desenvolvem matrizes de probabilidade dano, expressando de forma discreta a probabilidade condicional de obter um determinado nível de dano.

As técnicas indirectas determinam o índice de vulnerabilidade estabelecendo relações entre o grau de dano e a intensidade sísmica.

As técnicas convencionais caracterizam a vulnerabilidade independentemente do dano, utilizam-se para comparar diferentes construções de uma mesma tipologia numa área específica.

Por fim as técnicas híbridas utilizam a combinação das outras técnicas, como é o caso da metodologia macrossísmica desenvolvida por [Giovinazzi *et al.*, 2003]. Esta metodologia considera 5 classes de vulnerabilidade na matriz de probabilidade de dano e utiliza a *European Macroseismic Scale* (EMS-98) [Grunthal, 1998]. Sendo uma escala adaptável a diferentes tipologias estruturais, permite incluir diferentes subclasses de estruturas e diferentes níveis de danos observados, aos quais são atribuídas classes de vulnerabilidades distintas. Para um determinado tipo de dano é necessário definir a quantidade de ocorrências de forma linguística (few, many, most) desse dano em função da classe de vulnerabilidade e de intensidade da acção, de forma a definir matrizes de probabilidade de dano. Atendendo à dificuldade de definir objectivamente o número de ocorrências de um determinado nível de dano é aplicado o método dos conjuntos difusos [Klir *et al.*, 1995].

A metodologia aplicada na presente dissertação classifica-se como nível II (*second level approach*), pelo rigor na qualidade de informação e pela avaliação quantitativa. O procedimento da metodologia aplicada é considerado como híbrido, uma vez que na avaliação da vulnerabilidade para estimar os danos associa uma técnica indirecta e o uso de uma função de vulnerabilidade baseada em matrizes de probabilidade de dano (MPD).

### 5.4.2 Quantificação da vulnerabilidade sísmica

De modo a quantificar a vulnerabilidade sísmica, desenvolveram-se uma série de formatos que permitem estimar de modo directo ou indirecto o dano. A tendência de uma estrutura sofrer maior ou menor dano é essencialmente estimada através do estabelecimento de *índices* e *classes de vulnerabilidade*, enquanto que de modo a analisar a relação entre o dano e os diferentes níveis de acção sísmica podem-se usar *matrizes de probabilidade dano*, *curvas de vulnerabilidade* e *curvas de fragilidade*. De seguida é sucintamente explicada cada uma das formas de quantificação:

1) Através do uso das *classes de vulnerabilidade* é possível agrupar e caracterizar as construções em grupos idênticos de vulnerabilidade. Esta relação entre as estruturas e a vulnerabilidade é possível devido à observação dos danos sofridos em construções semelhantes, verificados em sismos anteriores. Actualmente a escala mais consensual é a EMS 98 proposta por [Grunthal, 1998], a qual está dividida em 6 grupos, sendo a classe (A) considerada muito vulnerável até à classe (F) onde a vulnerabilidade é considerada baixa.

2) A maior ou menor propensão de uma estrutura sofrer dano é analisada pelos *índices de vulnerabilidade*. Estes índices foram criados com base nas principais características do edifício após avaliações e inspecções.

3) A probabilidade de uma determinada estrutura sofrer um certo nível de dano após a ocorrência de uma acção sísmica é analisada pela *matriz probabilidade de dano*. Este é um método tipológico resultante de levantamentos de danos pós sismo em determinadas estruturas, sendo assim estabelecida uma escala de dano usando a intensidade macrosísmica ( $I$ ) ou a aceleração de pico no solo.

4) As *curvas de vulnerabilidade* analisam a relação contínua entre o dano e a intensidade sísmica através de estudos matemáticos e gráficos. As quais são criadas em função de diferentes tipologias construtivas, expressas em índices de vulnerabilidade. As curvas de vulnerabilidade podem ser traduzidas analiticamente por funções contínuas ou discretas. Tanto as curvas de vulnerabilidade como as MPD, são métodos de quantificação de elevada especificidade regional, ou seja, não é fiável a sua extrapolação para outras regiões.

5) As *curvas de fragilidade* expressam de modo contínuo a probabilidade de excedência do estado limite de dano, numa relação entre o dano e uma acção sísmica em diferentes estruturas.

Apesar das várias formas para quantificar a vulnerabilidade, a falta de homogeneidade faz com que exista uma grande dificuldade na comparação entre diferentes métodos.

## 5.5 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada para a avaliação da vulnerabilidade sísmica é semelhante à proposta por [GNDT-SSN, 1994] na medida em que define um índice de vulnerabilidade baseado na soma ponderada de parâmetros. No entanto, utiliza as curvas de vulnerabilidade da metodologia macrossísmica proposta por [Giovinazzi *et al.*, 2003]. É na correspondência entre a metodologia do GNDT II e a macrossísmica que se efectua o confronto das duas metodologias, afim de validar os índices de vulnerabilidade propostos por [Vicente *et al.*, 2007].

As curvas de vulnerabilidade da metodologia macrossísmica são obtidas pela expressão 5.2 que a partir do índice de vulnerabilidade ( $V$ ) de um determinado edifício, permite estimar o grau médio de dano ( $\mu_D$ ) para as várias intensidades da escala EMS-98.

$$\mu_D = 2,5 \times \left[ 1 + \tanh\left(\frac{I + 6,25 \times V - 13,1}{Q}\right) \right] ; 0 \leq \mu_d \leq 5 \quad (5.2)$$

Assim o grau de dano médio estimado ( $\mu_D$ ), depende do índice de vulnerabilidade ( $V$ ), da intensidade sísmica ( $I$ )(EMS-98) e de um factor de ductilidade ( $Q$ ). Onde o valor ( $V$ ) determina a posição da função de vulnerabilidade e o factor ductilidade determina a inclinação da função de vulnerabilidade. Recentemente a expressão 5.2 foi actualizada para uma representação mais precisa [Bernardini *et al.*, 2007], através de uma parametrização da MPD de um único parâmetro ( $V$ ), obtendo assim a expressão 5.3 e 5.4.

$$\mu_D = 2,5 \times \left[ 1 + 3 \times \tanh\left(\frac{I + 6,25 \times V - 12,7}{3}\right) \right] \times f(V, I) ; 0 \leq \mu_d \leq 5 \quad (5.3)$$

Onde

$$f(V, I) = \begin{cases} \rho^{\frac{v}{2}(I-7)} & I \leq 7 \\ 1 & I > 7 \end{cases} \quad (5.4)$$

Uma vez que o índice de vulnerabilidade da metodologia macrossísmica e GNDT II não são avaliadas da mesma forma, é necessária a comparação das duas metodologias de forma a calcular a relação dos índices de vulnerabilidade ( $I_v$ ) e ( $V$ ). Portanto, pelo confronto das duas curvas de vulnerabilidade em relação ao valor central médio ( $\mu_D=2,5$ ) obtém-se a expressão 5.5.

$$V = 0,592 + 0,0057 \times I_v \quad (5.5)$$

Na figura 5.6 está representado o confronto das duas metodologias, dando origem à expressão 5.5 pela comparação do valor médio de dano.

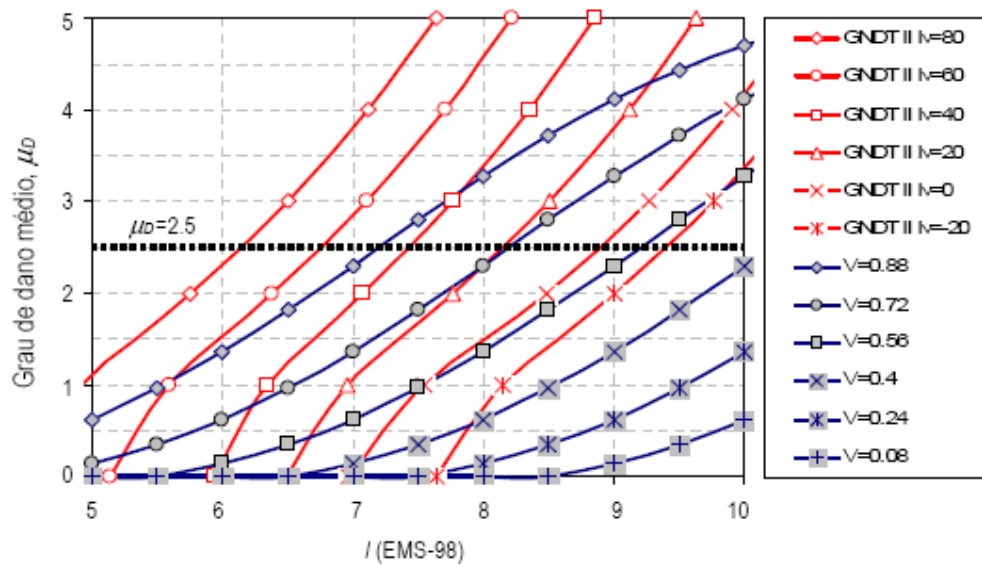


Figura 5.6 – Confronto das curvas de vulnerabilidade das metodologias macrossísmica e GNDT II, [Vicente, 2008]

## 5.6 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA

A metodologia aplicada neste trabalho para a avaliação da vulnerabilidade sísmica foi desenvolvida por [Vicente, 2008] que teve como base os trabalhos [GNDT-SSN, 1994] e [Giovinazzi *et al.*, 2003]. Na metodologia foram acrescentados 3 novos parâmetros aos 11 iniciais de [GNDT-SSN, 1994], para desenvolver uma avaliação da vulnerabilidade de edifícios habitacionais mais detalhada. Deste modo, a metodologia baseia-se no cálculo do Índice de Vulnerabilidade ( $I_v$ ) segundo a média ponderada de 14 parâmetros.

Cada parâmetro avalia um aspecto que influencia a resposta sísmica do edifício, estimando-se para cada parâmetro uma determinada classe de vulnerabilidade. A classe de vulnerabilidade é qualificada em 4 classes (A, B, C e D). A cada parâmetro é associado um peso que varia de 0.5 para os parâmetros menos importantes a 1.5 para os parâmetros mais importantes, no cálculo do índice de vulnerabilidade (ver tabela 5.3). O índice de vulnerabilidade de um edifício pode variar entre 0 e 650, mas o valor desta soma ponderada pode ser normalizado a um intervalo entre 0 e 100. Posteriormente são calculadas estimativas de dano e perdas segundo as funções de vulnerabilidade desenvolvidas por [Giovinazzi *et al.*, 2003]. Assim, o índice de vulnerabilidade estabelece o passo intermédio na estimativa de cenários de dano associados a níveis de acção sísmica definidos pela intensidade, EMS-98 [Grunthal, 1998] ou aceleração do solo (PGA).

Tabela 5.3 – Parâmetros e pesos associados para cálculo do índice de vulnerabilidade

Parâmetros	Classe $C_{vi}$				Peso $P_i$	Índice de Vulnerabilidade
	A	B	C	D		
$P1$ - Organização do Sistema	0	5	20	50	0,75	$I_v = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \cdot p_i$ $0 \leq I_v \leq 650$ (Iv normalizado) $0 \leq I_v \leq 100$
$P2$ - Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1,00	
$P3$ - Resistência convencional	0	5	20	50	1,50	
$P4$ - Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0,50	
$P5$ - Altura do edifício	0	5	20	50	1,50	
$P6$ - Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0,75	
$P7$ - Localização e interacção	0	5	20	50	1,50	
$P8$ - Irregularidade em planta	0	5	20	50	0,75	
$P9$ - Irregularidade em altura	0	5	20	50	0,75	
$P10$ - Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0,50	
$P11$ - Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1,00	
$P12$ - Tipo de Cobertura	0	5	20	50	1,00	
$P13$ - Danos estruturais identificados	0	5	20	50	1,00	
$P14$ - Elementos não-estruturais	0	5	20	50	0,50	

Na Tabela 5.3 estão representadas os 14 parâmetros usados para o cálculo do índice de vulnerabilidade, com indicação dos respectivos pesos e classes. A atribuição do valor do peso de



cada parâmetro foi obtida de forma empírica, em consenso com a experiência e conhecimento dos autores do presente trabalho. Contudo, a incerteza associada à atribuição dos pesos será posteriormente melhorada à medida de novas aplicações desta metodologia, contribuindo para a calibração e análise de sensibilidade, comparando o resultado dos danos obtidos e os danos observados.

De seguida faz-se uma descrição detalhada de cada um dos 14 parâmetros considerados para a aplicação da metodologia.

O parâmetro 1 (*PI*) pretende avaliar o sistema resistente por apreciação da organização das paredes e qualidade de concepção do edifício, tendo em conta a eficiência das ligações entre paredes e entre estas e elementos horizontais. Na Figura 5.7 apresentam-se esquemas de vários tipos de ligação entre elementos estruturais para uma melhor avaliação da classe do parâmetro. As imagens da Figura 5.8 identificam os tipos de ligação nos cunhais em paredes de alvenaria.

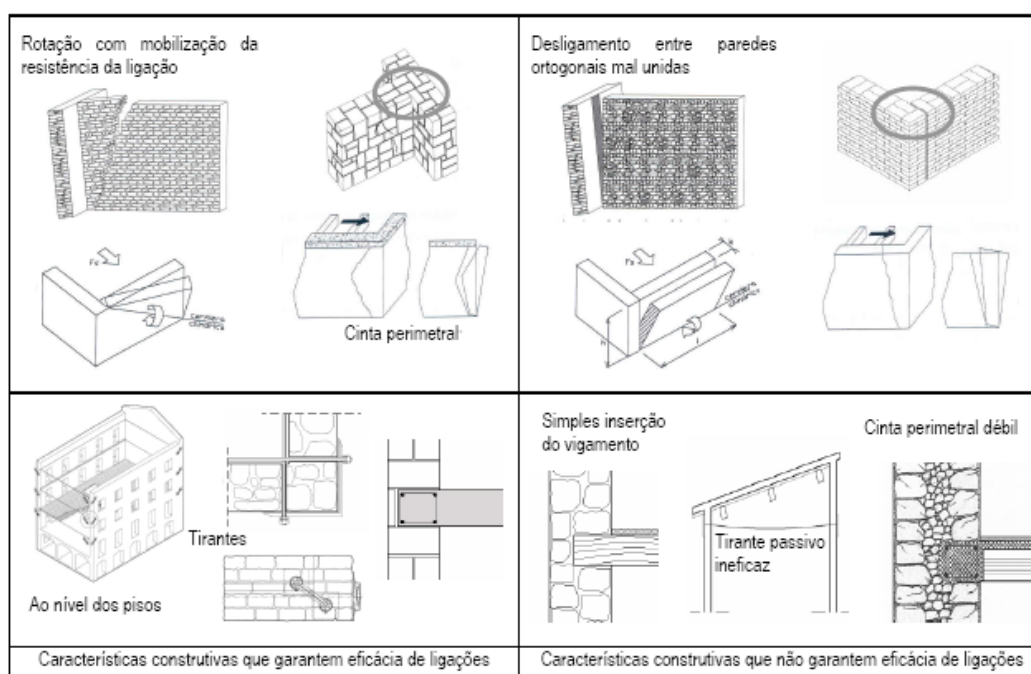


Figura 5.7 – Esquemas de caracterização das ligações entre elementos estruturais, [Vicente, 2008]



Figura 5.8 – Caracterização do tipo de ligação nos cunhais, [Vicente, 2008]

A qualidade das alvenarias é avaliada no parâmetro 2 ( $P2$ ) e está relacionada com três factores: i) homogeneidade do material e a sua forma, dimensão e natureza; ii) forma de assentamento ao longo da extensão das paredes resistentes; iii) tipo de ligação transversal interna da própria parede. Na Figura 5.9 esta representada a classificação das classes de vulnerabilidade de forma mais detalhada, visto que apresenta um esquema ilustrativo, acompanhado da respectiva descrição.





	<p>Alvenaria de pedra homogénea, com bons assentamentos e argamassa de boa qualidade.</p>
	<p>Alvenaria de pedra não homogénea, com argamassa de boa qualidade. Apresentando embricamento e bons travamentos.</p>
	<p>Alvenaria de pedra irregular e arredondada, com ligação transversal. Argamassa de média qualidade.</p>
	<p>Alvenaria de pedra constituída por dois panos com núcleo de elementos de pequena dimensão e sem ligação. Argamassa de fraca qualidade.</p>

Figura 5.9 – Classes para avaliação da qualidade das alvenarias, adaptado de [Vicente, 2008]

No parâmetro 3 ( $P3$ ) a avaliação é feita considerando a acção sísmica no edifício. Esta avaliação é feita através do cálculo da resistência do edifício face às acções sísmicas, de forma a

obter o valor da resistência convencional. Para o cálculo da resistência são considerados valores característicos, obtidos por estudos experimentais “in-situ” em edifícios de construção tradicional do parque habitacional da ilha do Faial, [Costa *et al.*, 2007].

O parâmetro 4 (*P4*) considera a possível separação que pode ocorrer entre paredes transversais, considerando a sua intercepção com paredes resistentes principais (paredes mestras). Assim sendo, é possível avaliar o risco de colapso para fora do plano, dos painéis de alvenaria de pedra. Na Figura 5.10 está representado um esquema do mecanismo de colapso para fora do plano.

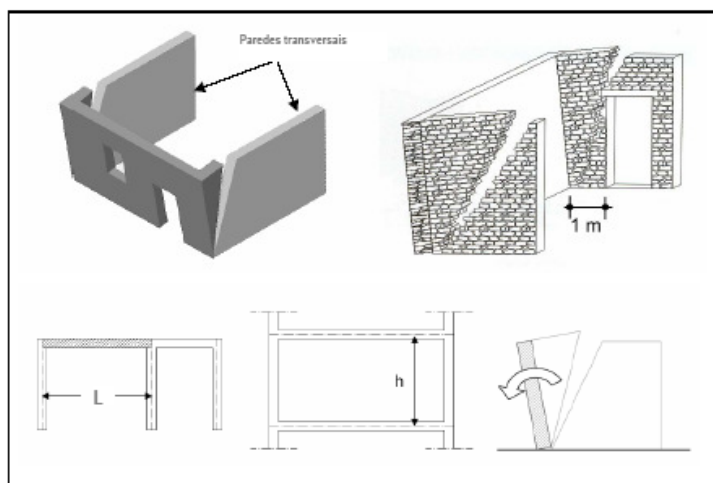


Figura 5.10 – Esquema de colapso para fora do plano, [Vicente, 2008]

A susceptibilidade do edifício face às suas irregularidades estruturais (falta de prumo das paredes) é avaliada no parâmetro 5 (*P5*). São considerados fenómenos de degradação, anomalias e efeitos de segunda ordem, baseando-se no facto de que a altura dos edifícios está relacionada com a vulnerabilidade e esta depende do tipo de acção sísmica a que o edifício está sujeito.

O parâmetro 6 (*P6*) avalia a implantação dos edifícios face ao tipo de terreno e respectivas fundações, considerando a inclinação do terreno e diferenças de cotas das fundações. Os solos são considerados segundo as designações descritas no EC8.

A deformabilidade e flexibilidade dos edifícios são avaliadas no parâmetro 7 (*P7*). Estas deformações dependem da localização do edifício face a um conjunto, o que influencia a resposta às acções laterais. Estas acções laterais podem tanto actuar de forma benéfica ou prejudicial consoante a respectiva situação.

Os desníveis iguais ou superiores a 0.5 m são considerados suficientes para originar o efeito "pounding", assim sendo contribuem para o agravamento da classe de vulnerabilidade. A

presença de pavimentos em betão armado (maciços, aligeirados, mistos (aço-betão)) em edifícios confinantes com edifícios em alvenaria com pavimentos de madeira, induzirá um efeito conhecido como "pounding". Na Figura 5.11 está esquematizado o fenómeno das acções laterais.

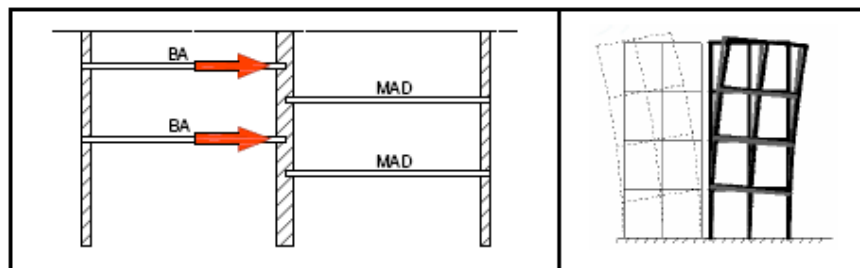


Figura 5.11 – Esquema de deformação por acções laterais, [Vicente, 2008]

O parâmetro 8 ( $P8$ ) avalia a irregularidade em planta do edifício de forma bastante simplificada, tendo em conta apenas um critério geométrico. Este parâmetro penaliza os edifícios com geometria em planta de dimensões assimétricas, com grande desenvolvimento e ainda com saliências que podem provocar torções em planta e concentração de esforços nos elementos mais afastados dos centros de gravidade e de rigidez. Na Figura 5.12 estão representados diferentes tipos de configurações de irregularidades em planta.

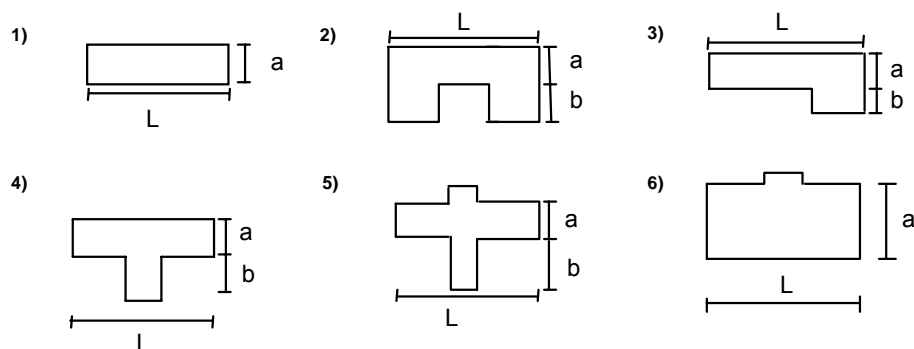


Figura 5.12 – Irregularidades em planta

No parâmetro 9 ( $P9$ ) pretende-se avaliar a irregularidade em altura do edifício. Para tal, é considerado a existência de edifícios com a mesma ou diferentes alturas e com mais que uma empena. Na Figura 5.13 está representado um esquema ilustrativo dos diferentes tipos de irregularidades em altura.



Figura 5.13 – Esquema representativo das classes de vulnerabilidade do parâmetro 9

O parâmetro 10 (*P10*) avalia a vulnerabilidade do edifício em função da presença de aberturas (vão). As aberturas não alinhadas contribuem de modo negativo, originando um fluxo de tensão (criação de tensão tangencial) e o caminho da carga de forma excessiva em padieiras. De referir que em caso de acção sísmica este efeito (componente vertical acrescida) é muito agravado.

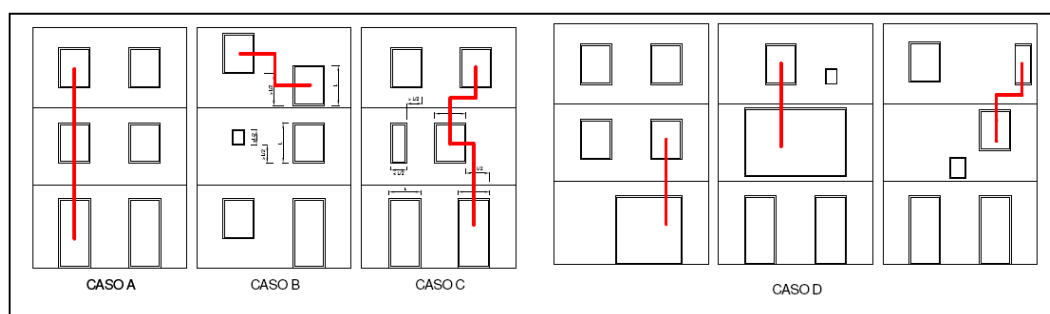


Figura 5.14 – Esquema representativo das classes de vulnerabilidade do parâmetro 10

A rigidez dos pavimentos é avaliada no parâmetro 11 (*P11*). Em construções tradicionais considera-se como sendo uma solução favorável a existência de pavimentos flexíveis (uso de vigas/grelha de elementos resistentes em madeira) quando bem conectados às paredes resistentes. Por outro lado, a existência de pavimentos rígidos (laje em betão armado), apoiados em paredes de alvenaria sem reforço, com ligação insuficiente entre parede/laje, apresenta-se como uma solução

<p><b>Pavimento deformável</b></p> <p>Descrição: Pavimento de barrotes ou vigamentos em uma ou duas direcções com soalho. Pavimentos muito ligeiros com baixa rigidez de diafragma.</p>		
<p><b>Pavimento semi-rígido</b></p> <p>Descrição: Pavimentos de perfis de aço com pequenas abóbodas cerâmicas com um enchimento pouco espesso (espécie de conglomerado) com um revestimento (marmorite, cerâmico ou madeira).</p> <p>Descrição: Pavimento de barrotes ou vigamentos com tarugamento apertado ou com contra-soalho de espessura considerável.</p> <p>Descrição: Pavimento aligeirado com elementos cerâmicos e vigas em betão armado com uma lajeta de compressão não armada. Considere o pavimento semi-rígido no próprio plano do pavimento, se tratar-se de betão de medíocre qualidade.</p> <p>Descrição: Pavimento com estrutura de suporte em madeira (uma ou duas direcções) com uma lajeta armada com conectores por cima do soalho que funciona como uma cofragem. A lajeta armada garante uma boa rigidez no próprio plano do pavimento.</p>		
<p><b>Pavimento rígido</b></p> <p>Descrição: Laje aligeirada com lajeta de compressão armada, conferindo uma elevada rigidez no plano do pavimento.</p> <p>Descrição: Pavimento em perfis de aço e cofragem colaborante contínua e lajeta de enchimento armada, conferindo uma elevada rigidez no plano.</p> <p>Descrição: Laje maciça com comportamento de diafragma em ambas as direcções.</p>		

Figura 5.15 – Tipos de pavimentos e sua rigidez, [Vicente, 2008]

O parâmetro 12 (*PI2*) pretende avaliar a existência ou não de impulsos provocados pela cobertura nas paredes, como também averiguar a existência de elementos de ligação; este efeito

está representado na Figura 5.16. É importante conhecer a tipologia da cobertura e quantificar a área de apoio perimetral efectiva, de modo a analisar a área de parede que influi na absorção e transmissão da carga.

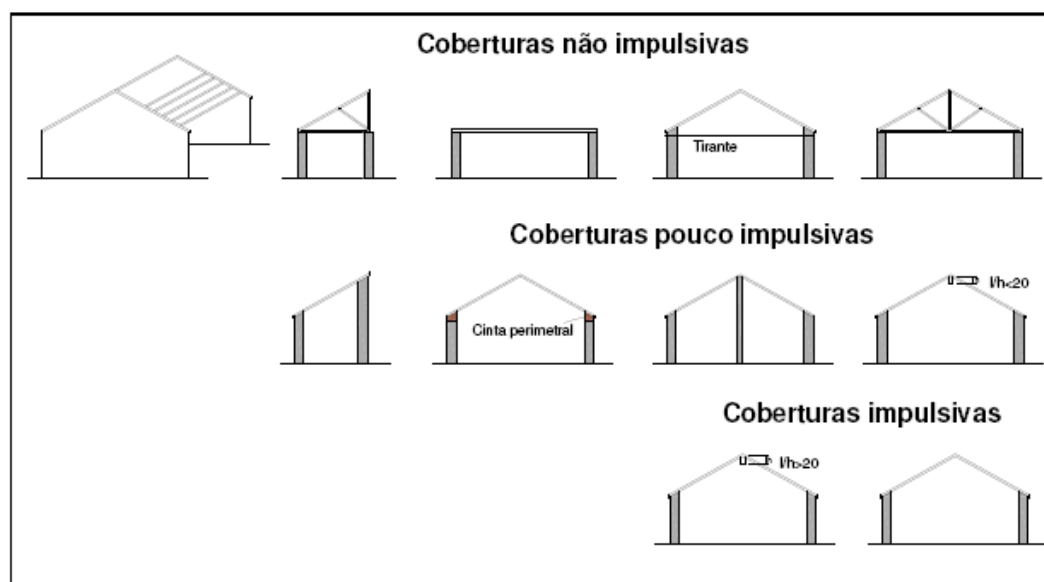


Figura 5.16 – Classificação dos tipos de cobertura, [Vicente, 2008]

Os danos estruturais do edifício são avaliados no parâmetro 13 (*P13*), pretendendo-se com este parâmetro detectar fragilidades existentes na estrutura. Estes danos podem agravar de forma substancial a vulnerabilidade do edifício, nomeadamente: fissurações em cunhais, desligamento de paredes, fissuração por transmissão de carga indevida, abaulamento, deformações e esmagamentos. Alguns destes danos estão identificados na Figura 5.17.



Figura 5.17 – Identificação de diferentes tipos de danos estruturais, [Vicente, 2008]



Por último, os elementos não estruturais do edifício (chaminés e outros elementos externos à estrutura) são avaliados no parâmetro 14 (*PI4*). Em caso de acção sísmica a existência destes elementos quando mal conectados à estrutura, originam um elevado agravamento da sua vulnerabilidade. Como exemplo, referem-se os balcões sem conexão aos elementos horizontais construídos posteriormente à construção da estrutura, e o revestimento de tecto de grande extensão e mal ligado. Alguns tipos de elementos não estruturais estão representados na Figura 5.18.



Figura 5.18 – Tipos de elementos não estruturais, [Vicente, 2008]

## 5.7 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE EM EDIFÍCIOS – IMPORTÂNCIA DA COMPONENTE VERTICAL DA ACÇÃO SÍSMICA

Como já foi referido a vulnerabilidade sísmica estima probabilidade de um edifício se danificar na ocorrência de uma acção sísmica. Sendo a acção sísmica o resultado de um conjunto de vibrações do solo que são transmitidas às estruturas durante um evento sísmico. Os valores característicos da acção sísmica são quantificados em função da sismicidade da zona e da natureza do local de implantação do edifício. Em geral para a verificação da segurança de um edifício, apenas são consideradas acções sísmicas no plano horizontal, e a consideração da direcção vertical apenas se impõe para estruturas sensíveis a vibrações nesta mesma direcção [RSA, 1983].

Como o caso de estudo da presente dissertação localiza-se numa zona sísmica tipo 2 segundo EC8 [CEN, 2004] definida por eventos sísmicos próximos, caracterizada por acções



sísmicas verticais, correspondendo a deslocamentos significativos na direcção vertical em edifícios de construção em alvenaria de pedra (construção tradicional).

De uma forma geral, as metodologias existentes na bibliografia para a análise da vulnerabilidade, têm por base a quantificação da resposta dos elementos construtivos face a acções horizontais, não contabilizando a vulnerabilidade dos elementos devido a acções verticais. Assim, é proposta uma nova avaliação da vulnerabilidade sísmica em edifícios localizados em zonas sísmicas tipo 2 segundo o EC8 [CEN, 2004].

Esta nova proposta para rectificar e melhorar a avaliação da vulnerabilidade em edifícios localizados na zona sísmica tipo 2 segundo o EC8 [CEN, 2004] (caso específico do Arquipélago dos Açores) consiste em duas medidas: sendo a primeira na reformulação do parâmetro ( $P3$ ) da avaliação da vulnerabilidade proposta por [Vicente, 2008]; a segunda consiste no agravamento dos pesos ( $p_i$ ) nos parâmetros ( $P1$ ,  $P2$  e  $P3$ ), responsáveis pela caracterização da vulnerabilidade face a uma acção sísmica vertical.

### 5.7.1 Reformulação do parâmetro P3

O parâmetro ( $P3$ ) avalia a resistência convencional do edifício através da expressão 5.6. A expressão da resistência convencional ( $C_{conv}$ ) foi obtida da directiva técnica da verificação sísmica Italiana [GNDT *et al.*, 1998] e representa uma verificação simplificada da segurança ao corte. Esta expressão consiste no confronto da resistência ao corte global, devido à acção sísmica com a resistência global, que representa a resistência última de todas as paredes paralelas à acção sísmica.

$$C_{conv} = \frac{a_0 \times \tau_k}{q \times N} \sqrt{1 + \frac{q \times N}{1,5 \times a_0 \times \tau_k \times (1 + \gamma)}} \quad (5.6)$$

Onde:

$$q = \frac{(A_x + A_y) \times h \times p_m}{A_t} + p_s \quad (5.7)$$

$\tau_k = 32$  kPa (valor de referência);

$a_0 = A_{\min} / A_t$ ;

$\gamma = A_{min} / A_{max}$ ;  $A_{min}$  - Área mínima (m<sup>2</sup>);  $A_{max}$  - Área máxima (m<sup>2</sup>);

$N$ - número de pisos;

$A_t$  - Área coberta (m<sup>2</sup>);

$A_x, A_y$  - Área total de parede resistente na direcção  $XX$  e  $YY$ , respectivamente (m<sup>2</sup>);

$h$  - Altura média entre pisos;

$p_m$  - Peso específico da alvenaria (kN/m<sup>3</sup>);

$p_s$  - Peso por unidade de área de pavimento (kN/m<sup>2</sup>).

Para quantificar a variação da resistência convencional ( $C_{conv}$ ) face a uma determinada acção sísmica vertical, é introduzido um coeficiente ( $K_v$ ), na componente da resistência global ao corte, traduzindo num desagravamento do peso próprio ( $q$ ), conforma a expressão 5.8.

$$C_{conv} = \frac{a_0 \times \tau_k}{q \times N} \sqrt{1 + \frac{q \times N \times (1 - K_v)}{1,5 \times a_0 \times \tau_k \times (1 + \gamma)}} \quad (5.8)$$

Onde:

$$K_v = \frac{S \times a_{gr} \times \frac{a_{vg}}{a_g}}{g}, K_v \in [0, 1] \quad (5.9)$$

$S$ = tipo de terreno, segundo EC8 consoante a zona sísmica;

$a_{gr}$ = valor da aceleração máxima de referência segundo EC8 [CEN, 2004] (Faial, zona sísmica 2.1  $a_{gr}=2,5 \text{ m/s}^2$ );

$\frac{a_{vg}}{a_g}$  = valor do parâmetro que define os espectros de resposta elásticos verticais segundo

EC8 [CEN, 2004] (para acção sísmica tipo 2,  $\frac{a_{vg}}{a_g}=0,95$ );

$g$ = valor da aceleração gravítica ( $g=9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Sendo o coeficiente ( $K_v$ ) representativo da relação entre a aceleração vertical e a aceleração gravítica, que traduz a redução do peso próprio do edifício. Na figura 5.19 podemos verificar a influência do coeficiente ( $K_v$ ) na redução da resistência convencional usando a expressão 5.8, considerando as características de um edifício tradicional da ilha do Faial.

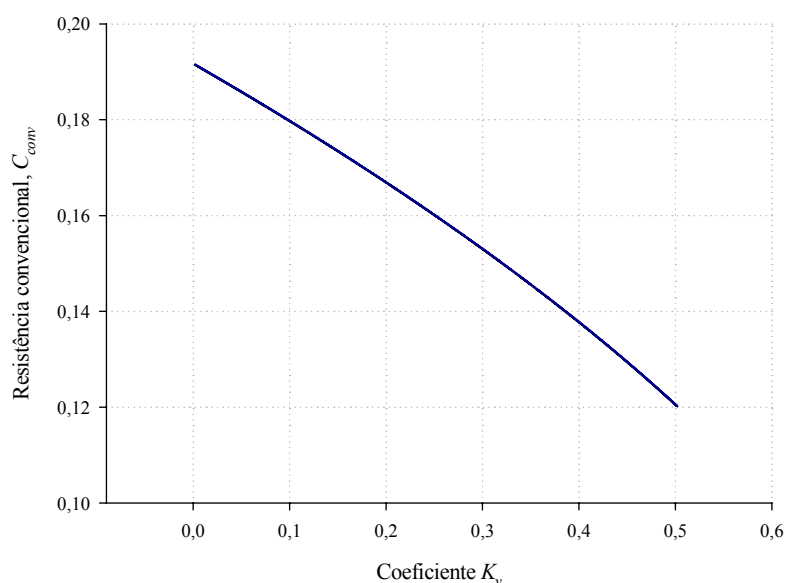


Figura 5.19 – Influência do coeficiente ( $K_v$ ) na função da resistência convencional

### 5.7.2 Agravamento dos pesos ( $p_i$ )

Para avaliar a vulnerabilidade de edifícios situados em zonas sísmicas tipo 2 segundo o EC8 [CEN, 2004], cuja acção vertical impõe deslocamentos verticais significativos contribuindo para uma maior probabilidade de sofrer dano, foram analisados todos os parâmetros da metodologia [Vicente, 2008]. Com esta avaliação pretendeu-se identificar quais os parâmetros responsáveis pela influência de acções verticais, sendo: ( $P1$ ) – tipo e organização do sistema resistente; ( $P2$ ) – Qualidade do sistema resistente e ( $P3$ ) – resistência convencional. Os três parâmetros pertencem ao grupo que avalia o sistema resistente do edifício, considerando a relação dos pesos dos diferentes parâmetros foram realizadas análises de sensibilidade. Deste modo obtiveram-se os seguintes pesos para os parâmetros ( $P1$ ,  $P2$  e  $P3$ ), conforme se verifica na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros e pesos associados para edifícios localizados em zona sísmica tipo 2, segundo EC8 [CEN, 2004]

Parâmetros	Classe Cvi				Peso	Índice de Vulnerabilidade
	A	B	C	D	Pi	
<b>P1 - Organização do Sistema</b>	0	5	20	50	1,50	$I_v = \sum_{i=1}^{14} Cvi \cdot p_i$ $0 \leq I_v \leq 812,5$ (Iv normalizado) $0 \leq I_v \leq 100$
<b>P2 - Qualidade do sistema resistente</b>	0	5	20	50	2,00	
<b>P3 - Resistência convencional</b>	0	5	20	50	3,00	
P4 - Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0,50	
P5 - Altura do edifício	0	5	20	50	1,50	
P6 - Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0,75	
P7 - Localização e interação	0	5	20	50	1,50	
P8 - Irregularidade em planta	0	5	20	50	0,75	
P9 - Irregularidade em altura	0	5	20	50	0,75	
P10 - Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0,50	
P11 - Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1,00	
P12 - Tipo de Cobertura	0	5	20	50	1,00	
P13 - Danos estruturais identificados	0	5	20	50	1,00	
P14 - Elementos não-estruturais	0	5	20	50	0,50	

Na comparação com a tabela 5.3 pode-se verificar que os pesos foram duplicados para os parâmetros (P1), (P2) e (P3). Estes pesos devem-se à aproximação do comportamento da curva gaussiana normal ajustada à distribuição do índice de vulnerabilidade para os valores da tabela 5.3.

## 5.8 AVALIAÇÃO COMPLEMENTAR DA VULNERABILIDADE

Numa primeira fase da avaliação do índice de vulnerabilidade foram analisados 260 edifícios distribuídos pela ilha do Faial, esta avaliação foi realizada com o detalhe descrito anteriormente pelos 14 parâmetros. De forma a obter um conjunto de edifícios relativamente próximos uns dos outros (em meio urbano) foi efectuado um procedimento expedito em 62 edifícios, baseado nos edifícios previamente analisados. A aplicação deste procedimento justifica-se pelas semelhanças no sistema construtivo dos edifícios no parque habitacional da ilha do Faial, verificado no capítulo 3. Este procedimento, pela falta de informação detalhada dos edifícios, recorre aos valores médios dos vários parâmetros do índice de vulnerabilidade. Assim, cada edifício assume o índice de vulnerabilidade médio dos edifícios com informação detalhada, sendo agravado ou reduzido em função dos factores modificadores. Os factores modificadores são exactamente os parâmetros da metodologia aplicada de fácil avaliação e de natureza qualitativa. Sendo definidos em função do valor médio de cada parâmetro obtido da análise detalhada dos edifícios. Neste trabalho, a avaliação complementar é aplicada apenas a edifícios urbanos, como tal os factores modificadores são obtidos pela avaliação detalhada de edifícios urbanos.

Na tabela 5.5 estão representados os factores modificadores e respectivos valores, baseados no valor médio do índice de vulnerabilidade obtido da análise detalhada para edifícios urbanos.

Tabela 5.5 – Parâmetros modificadores do índice de vulnerabilidade

URBANO	Classe de Vulnerabilidade, $C_{vi}$			
	0,0	5,0	20,0	50,0
Factores modificadores do índice de vulnerabilidade	A	B	C	D
P5 - Número de pisos	-1,0	0,0	3,1	9,3
P6 - Posição do edifício e fundações	-0,5	0,0	1,6	4,7
P7 - Localização e interacção	-4,1	-3,1	0,0	6,2
P8 - Irregularidade em planta	-2,1	-1,6	0,0	3,1
P9 - Irregularidade em altura	-2,1	-1,6	0,0	3,1
P12 - Tipo de cobertura	-2,8	-2,1	0,0	4,1
P13 - Danos estruturais identificados	-2,8	-2,1	0,0	4,1
Amplitude máxima de modificação, $SI_v$	-15,3	-10,3	4,7	34,7

O índice de vulnerabilidade com base nos factores modificadores é definido pela expressão 5.4.

$$I_v = \bar{I}_v + \sum \Delta I_v \quad (5.10)$$

Onde:

$I_v$  é o índice de vulnerabilidade final;

$\bar{I}_v$  é o índice de vulnerabilidade obtido da análise detalhada;

$\sum \Delta I_v$  é o somatório dos valores dos parâmetros modificadores.

## 5.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.9.1 Análise dos parâmetros

Da análise dos parâmetros usados no cálculo do índice de vulnerabilidade foi possível obter informações relacionadas com o carácter estrutural dos edifícios do parque habitacional da ilha do Faial. Os indicadores utilizados na análise foram, a área de parede resistente (parâmetro (P2) e (P3)), a resistência convencional (parâmetro (P3)) e a esbelteza das paredes de alvenaria (parâmetro (P4)).

Na figura 5.20(a) esta representada a relação entre a área em planta  $A_t$  e as áreas das paredes resistente nas duas direcções ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_{x+y}$ ). Esta relação constitui um indicador da qualidade e segurança estrutural, verificada em várias normas (EC8). Na análise do gráfico verifica-se que a área de parede resistente na direcção paralela às fachadas principais é inferior à direcção perpendicular à fachada ( $A_y$ ). Esta diferença justifica-se pelo facto das paredes de fachada apresentarem uma maior percentagem de aberturas, o que contribui para uma menor capacidade resistente.

A análise da resistência convencional ( $C_{conv}$ ), que representa a capacidade global resistente das paredes do edifício no seu plano, foi correlacionada com o quociente das áreas de parede ( $A_{max}/A_{min}$ ). Sendo o quociente das áreas de parede representativo do equilíbrio entre paredes nas duas direcções. Verifica-se na figura 5.20(b) que para relações ( $A_{max}/A_{min}$ ) próximas de 1 a resistência convencional é maior resultando num menor índice de vulnerabilidade.

Na análise da figura 5.20 (c) está representada a correlação entre o  $I_v$  e a esbelteza ( $h/s$ ; altura,  $h$  e espessura,  $s$ ) das paredes obtém-se uma tendência para índices de vulnerabilidade mais altas para edifícios de paredes esbeltas. Segundo o EC8 [CEN, 2004], os valores de esbelteza regulamentares para paredes de alvenaria, em zonas de baixa sismicidade variam entre 9 e 15. Observa-se no gráfico uma tendência para o aumento da vulnerabilidade com a esbelteza das paredes de alvenaria.

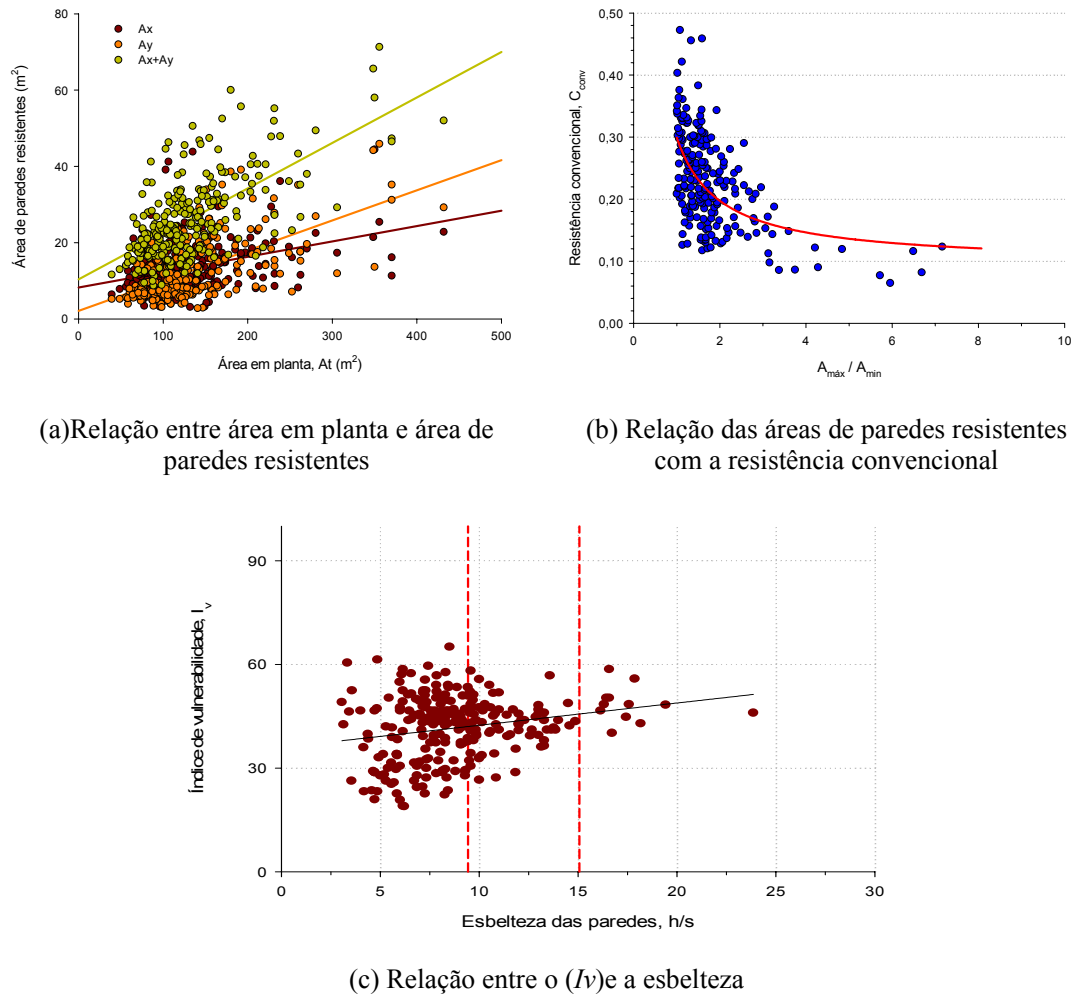


Figura 5.20 – Relação de alguns dados obtidos dos parâmetros

Na figura 5.21 estão representadas as distribuições das classes de alguns parâmetros, usados no cálculo do índice de vulnerabilidade de 260 edifícios na ilha do Faial. Os parâmetros apresentados são aqueles que têm o maior peso ( $P_i$ ), sendo os parâmetros (1,2,3, 5, 7 e 11) conforme a tabela 5.4. Os parâmetros que têm maior peso são respectivamente: ( $P1$ ) organização do sistema; ( $P2$ ) a qualidade do sistema resistente; ( $P3$ ) a resistência convencional; ( $P5$ ) altura do edifício, ( $P7$ ) localização e interacção e ( $P11$ ) diafragma horizontais. As possíveis acções de reforço em edifícios devem intervir nos referidos parâmetros, reduzindo de forma directa a vulnerabilidade.

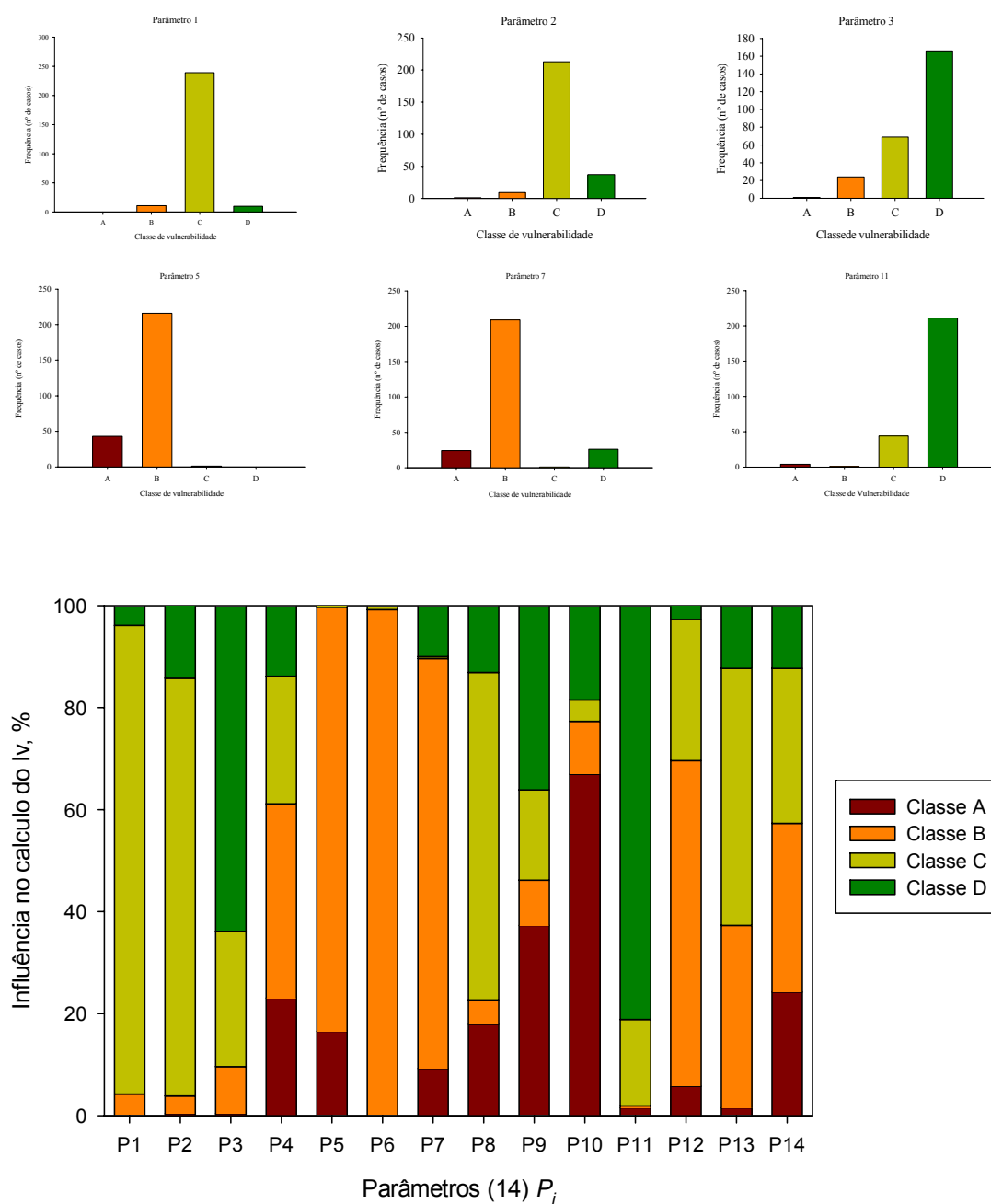


Figura 5.21 – Distribuição das classes dos parâmetros usados no cálculo de Iv

### 5.9.2 Vulnerabilidade do parque habitacional da ilha do Faial

A avaliação da vulnerabilidade efectuada num conjunto de 260 edifícios, repartidos por zonas rurais e urbanas da Ilha do Faial, apresenta um valor médio do índice de vulnerabilidade de



41,62 numa escala de (0-100). Os 60 edifícios afectados da avaliação complementar do Iv apresentam uma média de 37,01. Verifica-se que cerca de 63 % do edificado analisado apresenta um valor do índice de vulnerabilidade acima dos 40 e cerca de 40% acima dos 50. Aproximadamente 1% do edificado apresentam um índice de vulnerabilidade inferior a 20. Na figura 5.22 estão representados os histogramas da distribuição dos valores do Iv para 320 edifícios, sendo 260 obtidos de forma detalhada e 60 de forma complementar (descrito em 5.9), na figura 5.23 estão as respectivas funções normais ajustadas.

Pode-se observar que os índices de vulnerabilidade correspondem segundo a classificação EMS-98, à classe A (mais provável). O índice de vulnerabilidade máximo obtido da análise detalhada foi de 65,08 pertencente a um edifício localizado em zona rural. Contudo o valor médio do Iv para edifícios localizados em zonas rurais regista 40,71 e os edifícios urbanos 42,76. O valor médio do índice de vulnerabilidade  $I_v=41,62$  aponta para uma vulnerabilidade elevada do edificado. Os edifícios com um índice de vulnerabilidade superior a 45 devem ser reavaliados, caso se justifique, recorrendo a outras metodologias avaliações mais específicas.

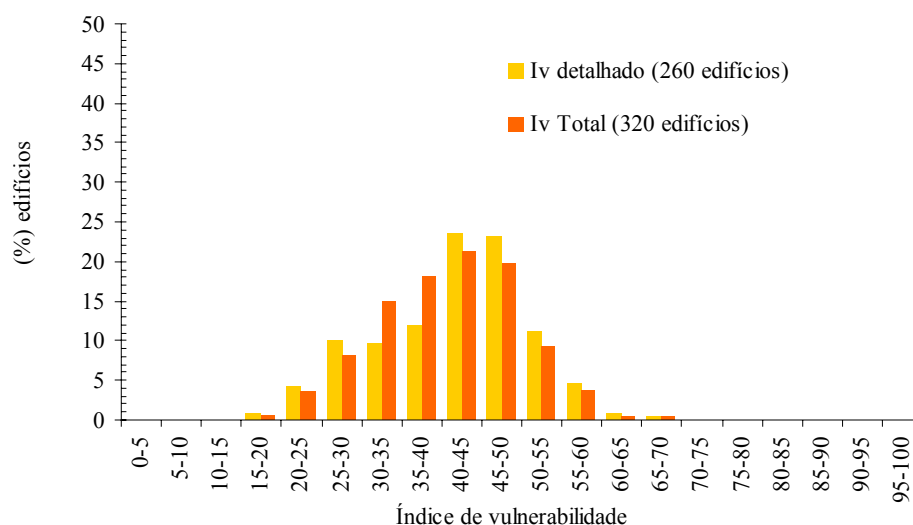


Figura 5.22 – Histograma da distribuição do índice de vulnerabilidade de 320 edifícios,

Universo da amostra (260 + 60) edifícios

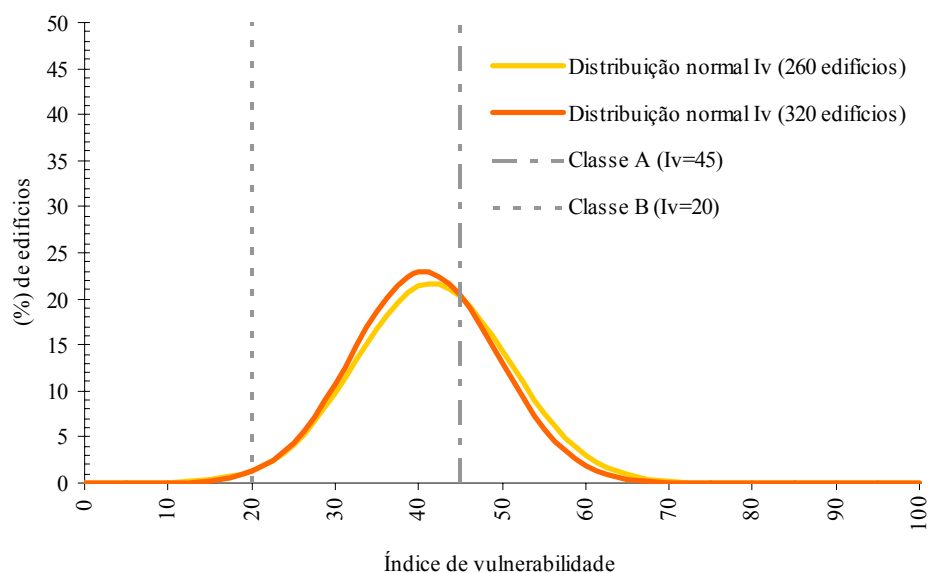


Figura 5.23 – Curva gaussiana normal ajustada à distribuição dos índices de vulnerabilidade de 320 edifícios, Universo da amostra (260 + 60) edifícios

O desvio padrão da avaliação detalhada (260 edifícios) é de 9,18, para a avaliação complementar (60 edifícios) é de 4,13. Os valores baixos do desvio padrão são representativos da homogeneidade das tipologias construtivas como também da fiabilidade dos resultados obtidos.

Os resultados obtidos pela presente metodologia devem ser interpretados estatisticamente, ou seja devem ser considerados de forma comparativa entre os valores médios e os limites superiores e inferiores.

Os dados obtidos da aplicação da metodologia foram inseridos numa base de dados, de forma a poderem ser visualizados num sistema de identificação geográfico, permitindo uma visão global de todo o perímetro em estudo, evidenciando as características do edificado e a análise espacial da vulnerabilidade sísmica. Na figura 5.24 visualiza-se a distribuição espacial da vulnerabilidade sísmica de um conjunto de edifícios urbanos situados na cidade da Horta, verifica-se que grande parte dos edifícios apresenta um índice de vulnerabilidade superior a 40.

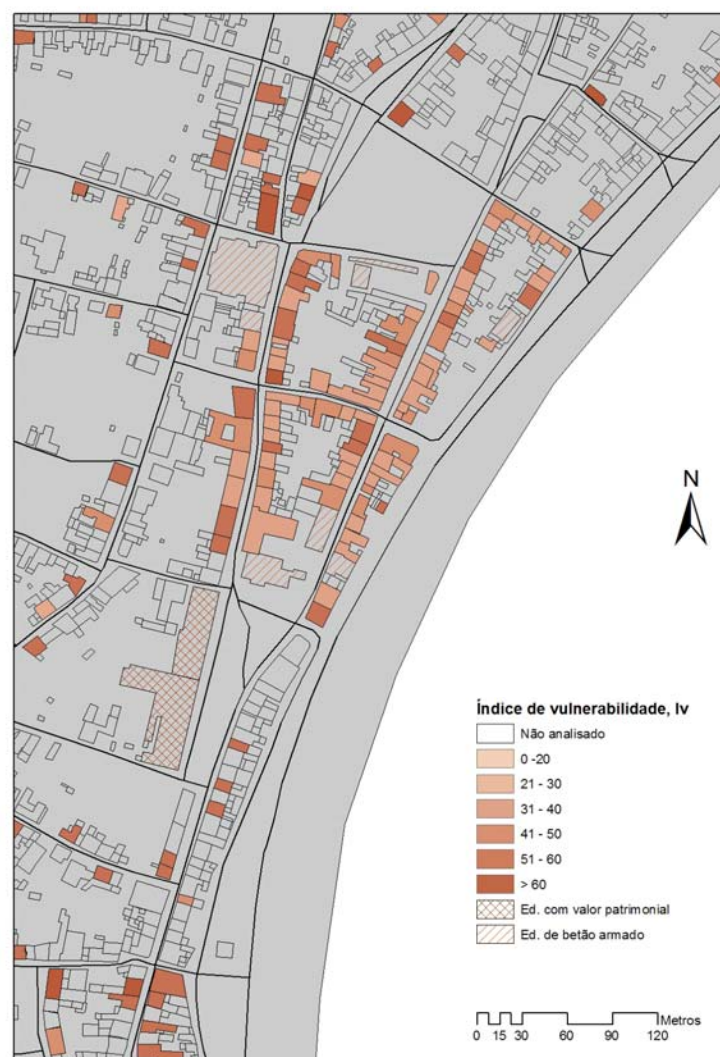


Figura 5.24 – Mapeamento da vulnerabilidade ( $I_v$ ) estimada do edificado

## 5.10 NÍVEL DE CONFIANÇA

Existe sempre um certo nível de incerteza relacionado com a escolha humana, neste estudo existem várias opções para definir os parâmetros de  $I_v$ . De modo a quantificar a incerteza envolvida na selecção das escolhas foi criada uma classificação para o nível de confiança (tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Definição dos níveis de confiança

Classificação do nível de confiança	
E	Informação de elevada qualidade: Informação observada directamente ou medida “in-situ” com apoio de registos geométricos. Recurso a sondagens de prospecção;
M	Informação de média qualidade: Informação oral fiável, conhecimento profundo da construção antiga local e tecnologia construtiva, visualização de fotografias e informação de situações análogas;
B	Informação de qualidade medíocre: Informação baseada na suposição, com um grau de certeza baixo, por vezes de escolha casual;
A	Ausência de informação: Escolha aleatória, podendo-se fixar este grau de certeza, na impossibilidade de avaliar um determinado parâmetro, em todos os casos, arbitrando um valor indicativo.

Na Figura 5.25 está representado o histograma do nível de confiança de todos os parâmetros de vulnerabilidade dos 260 edifícios (média ponderada de cada parâmetro). Para expressar resultados numéricos numa escala de nível de confiança, foi criada uma classificação de 3 categorias para cada nível de confiança. (por exemplo, M-,M+,M/E).

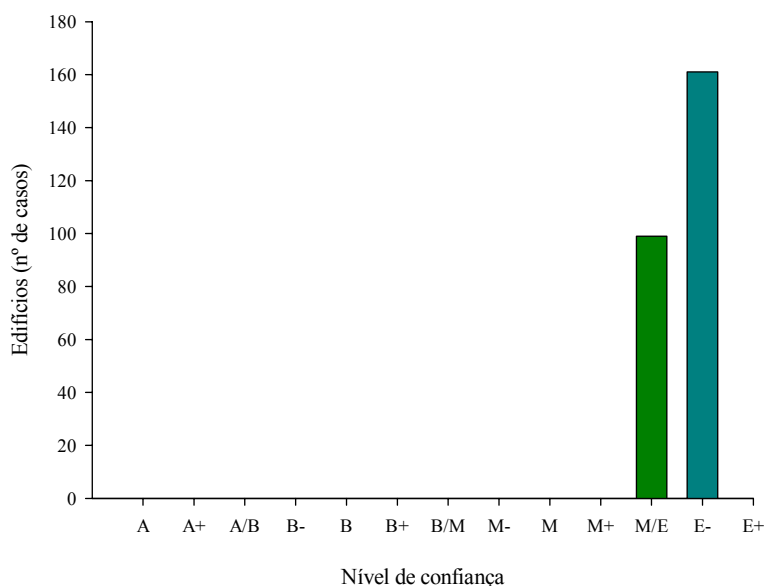


Figura 5.25 – Histograma do nível de confiança na avaliação dos parâmetros (EMBA)

Da análise da figura 5.25 verifica-se que na maioria dos casos o nível da informação teve confiança elevada (E), isto deve-se ao facto da informação recolhida apresentar rigor e detalhe. Nomeadamente as áreas e pormenores construtivos dos edifícios serem obtidas com base nos desenhos dos projectos de execução em formato digital.

## 5.11 ESTIMATIVA DE DANOS

Após aplicar a metodologia proposta por [Vicente, 2008] para avaliar o índice de vulnerabilidade sísmica, procedeu-se ao cálculo do valor médio de dano ( $\mu_d$ ) da intensidade sísmica EMS-98 através da expressão 5.3, onde foi considerado um factor de ductilidade ( $Q$ ) de 3. As curvas de vulnerabilidade estão representadas na figura 5.26 para os valores médios do índice de vulnerabilidade ( $I_v=41,62$ ) estimados para o parque habitacional da ilha do Faial. Juntamente apresentam-se os valores característicos da distribuição gaussiana, definidos pela adição e subtração de uma e duas vezes o valor do desvio padrão ( $\sigma_{I_v}=9,18$ ) da distribuição do índice de vulnerabilidade médio para 260 edifícios.

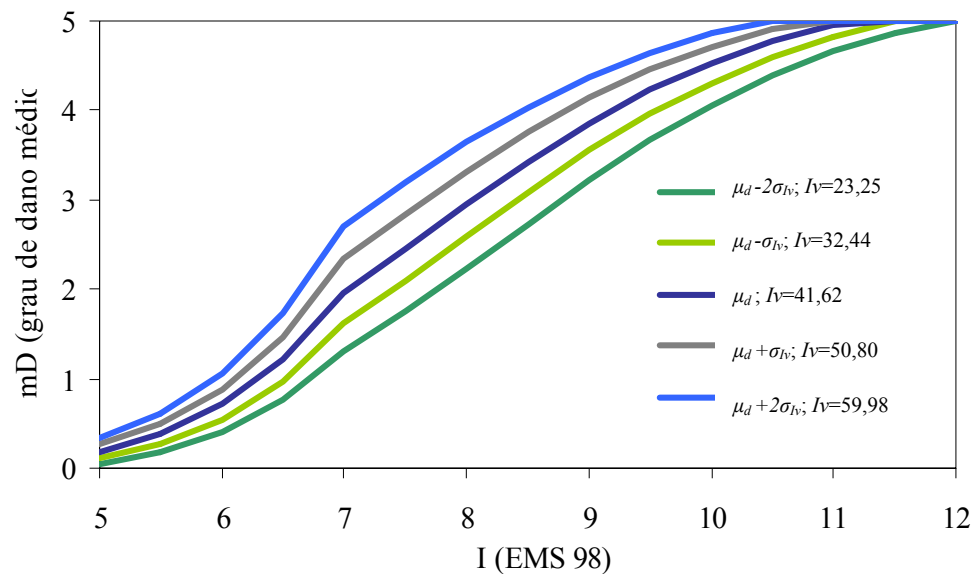


Figura 5.26- Curvas de vulnerabilidade do parque habitacional da ilha do Faial

É possível definir histogramas de dano para diferentes intensidades usando o grau médio de dano, ( $\mu_d$ ) recorrendo a funções de probabilidade *binomial* ou *beta*. Neste estudo foi utilizada uma função de densidade probabilidade *beta* pela possibilidade de controlar os parâmetros que definem

a sua geometria ( $t$ ) e ( $r$ ) em função da distribuição de dano resultante de estudos mais detalhados. A expressão da distribuição é a seguinte.

$$PDF : p_b(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r) \times \Gamma(t-r)} \times \frac{(x-a)^{r-1} \times (b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}}; \quad a \leq x \leq b \quad (5.11)$$

A expressão 5.12 define a função densidade probabilidade contínua, em que ( $r$ ) e ( $t$ ) são parâmetros que regulam a geometria da distribuição; a e b são os limites da distribuição, onde se assume a=0 e b=5; ( $\Gamma$ ) é a função gamma. Também se pode escrever da seguinte forma assumindo os valores de ( $a$ ) e ( $b$ ).

$$p_b(x) = \Gamma(t, r) \times \frac{x^{r-1} (5-x)^{t-r-1}}{(5)^{t-1}} \quad (5.12)$$

Onde ( $r$ ) e ( $t$ ) são relacionáveis com a variável contínua ( $x$ ) a variância ( $\sigma_x^2$ ) e o valor médio ( $\mu_x$ ).

$$t = \frac{\mu_x(5 - \mu_x)}{\sigma_x^e} - 1 \quad (5.13)$$

$$r = t \times \frac{\mu_x}{5} \quad (5.14)$$

A expressão 5.15 define a distribuição discreta para definir a probabilidade associada a cada dano  $D_k$ , com  $K \in [0, 5]$ .

$$P(D_0) = p(0) = \int_0^{0,5} K(t, r) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx$$

$$P(D_0) = p(0) = \int_{K-0,5}^{K+0,5} K(t, r) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx \quad K=1, 2, 3 \text{ ou } 4 \quad (5.15)$$

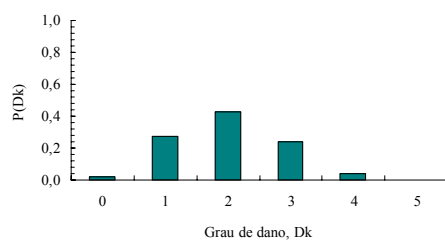
$$P(D_0) = p(0) = \int_{4,5}^5 K(t, r) \cdot x^{r-1} (5-x)^{t-r-1} dx$$

Na relação análoga entre os parâmetros da distribuição beta discreta e contínua obtém-se a expressão que define a variância ( $\sigma_d^2$ ) da distribuição discreta do dano caracterizada pelo grau de dano médio, ( $\mu_d$ ).

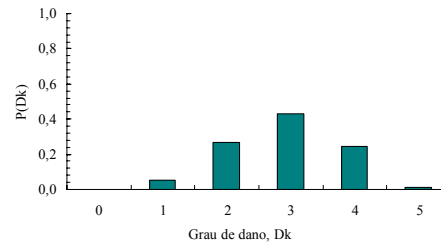
$$\sigma_d^e = \frac{\mu_d \times (b + a - \mu_d) - b \times a}{t + 1} \quad (5.16)$$

A variância, ( $\sigma_d^2$ ) é definida em função do grau médio de dano ( $\mu_d$ ) e dos parâmetros ( $a$ ), ( $b$ ) e ( $t$ ). Sendo ( $t$ ) um valor obtido pela informação deduzida da escala EMS-98 [Grunthal, 1998] segundo uma MDP associada a uma determinada classe de vulnerabilidade.

Na figura 5.27 estão representadas as distribuições de dano estimadas, usando a distribuição beta com ( $t=8$ ), ( $a=0$ ) e ( $b=5$ ) para intensidades sísmicas VII e VIII para o valor médio de vulnerabilidade ( $I_v=41,62$ ), estimado para o parque habitacional da ilha do Faial.



(a) Intensidade VII, (EMS-98);  $\mu_d=1,97$



(b) Intensidade VIII, (EMS-98);  $\mu_d=2,96$

Figura 5.27 – Distribuição de dano estimado para  $I_v=41,63$

A distribuição dos valores de dano médio ( $\mu_d$ ) para um conjunto de edifícios localizados na cidade da Horta, representa-se de seguida recorrendo à ferramenta SIG. Na figura 5.28 e figura 5.29 é possível observar o cenário de dano para a acção sísmica caracterizada por uma intensidade VII e VIII respectivamente, sendo estes cenários representativos da sismicidade dos Açores para períodos de retorno relativamente curtos.



Figura 5.28 – Cenário de dano para  
I=VII, (EMS-98)



Figura 5.29 – Cenário de dano para  
I=VIII, (EMS-98)

Observa-se que para os cenários de intensidade VII o grau médio de dano varia entre 0,92 e 2,64, no cenário de dano de intensidade VIII varia entre 1,74 e 3,64. Estes valores de dano consideram-se preocupantes para grande parte dos edifícios pela sua vulnerabilidade, registando colapsos face a um cenário sísmico frequente no arquipélago dos Açores.

## 5.12 CURVAS DE FRAGILIDADE

Assim como as curvas de vulnerabilidade, as curvas de fragilidade definem a relação entre a intensidade sísmica e o dano, expressando a probabilidade cumulativa condicional de exceder um determinado dano para um determinado valor do índice de vulnerabilidade, através da função de densidade *beta* cumulativa. As probabilidades discretas,  $P(D_k=d)$  são obtidas pela diferença das probabilidades cumulativas  $P_d[D_i \geq d]$ :

$$P(D_k=d) = P_d[D_k \geq d] - P_d[D_{k+1} \geq d] \quad (5.17)$$



Na figura 5.30 estão representadas as curvas de fragilidade obtidas para um valor médio de  $I_v=41,62$ .

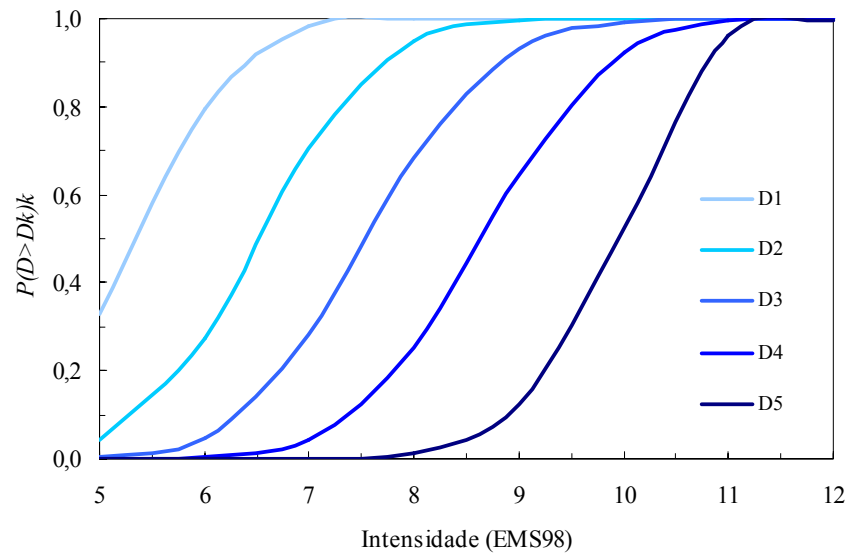


Figura 5.30 – Curvas de Fragilidade ( $I_v= 41,62$ )

### 5.13 AVALIAÇÃO DE PERDAS

De seguida apresenta-se a avaliação das perdas a partir dos resultados da estimativa de dano, os resultados da avaliação de perdas são apresentados de duas formas. Sendo uma a construção de cenário de dano através de distribuições probabilísticas globais dos índices de vulnerabilidade dos edifícios e outra através de um sistema SIG visualizando.

Os modelos de estimativa de perdas são relacionados com o nível de dano físico, os procedimentos mais utilizados são propostos por [HAZUS, 1999] sendo baseados em estimativas e observações de dano.

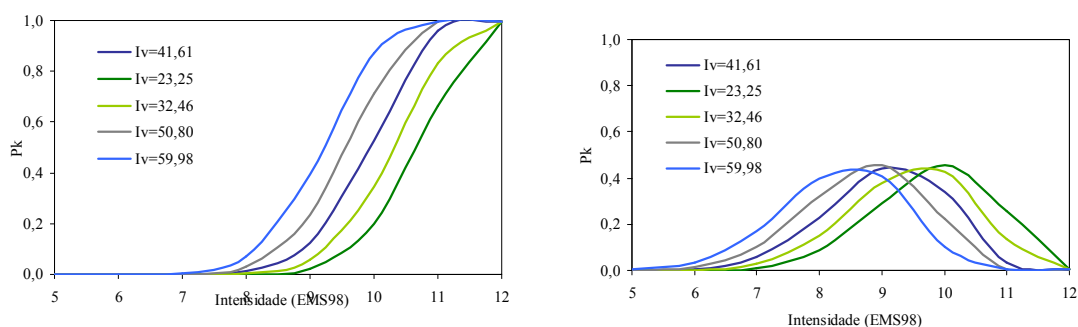
Para avaliar a probabilidade de colapso e inutilização dos edifícios adoptou-se a proposta de [Bramerini *et al.*, 1995]. As estimativas de perdas são obtidas por expressões de carácter empírico combinadas com valores probabilísticos de ocorrência de dano. Adoptou-se o uso dos seguintes valores no cálculo de edifícios inutilizáveis:  $W_{ei,3}= 0,4$ ;  $W_{ei,4}= 1,0$ , na expressão 5.19.

$$P_{colapso} = P(D_5) \quad (5.18)$$

$$P_{\text{edifícios inutilizáveis}} = P(D_3) \times W_{ei,3} + P(D_4) \times W_{ei,4} \quad (5.19)$$

Onde  $P(D_i)$  é a probabilidade de ocorrência de um determinado nível de dano ( $D_1$ ) a ( $D_5$ ) e ( $W_{ei}$ ) representam os pesos que definem a percentagem de edifícios associado ao nível de dano  $D_i$ .

As probabilidades de colapso e de inutilização de edifícios para diferentes valores de  $I_v$  ( $I_{v\text{médio}} - 2\sigma_{iv}$ ;  $I_{v\text{médio}} - \sigma_{iv}$ ;  $I_{v\text{médio}}$ ;  $I_{v\text{médio}} + \sigma_{iv}$ ;  $I_{v\text{médio}} + 2\sigma_{iv}$ ) estão representadas na figura 5.31. Observa-se que o número de edifícios inutilizáveis decresce, com o aumento da intensidade, à medida que o número de edifícios colapso aumenta.



(a) Probabilidade de colapso

(b) Probabilidade de inutilização dos edifício

Figura 5.31 – Probabilidade de colapso e probabilidade de inutilização dos edifícios para diferentes valores de  $I_v$

Os valores de probabilidade de colapso e de edifícios inutilizáveis calculados para sismos de moderada/elevada intensidade (VII, VIII, IX e X) estão apresentados na tabela 5.7, para a amostra de 260 edifícios ( $I_{v\text{médio}}=41,63$ )

Tabela 5.7 – Estimativa de colapsos e edifícios inutilizáveis para a amostra de 260 edifícios

	Intensidade sísmica, I(EMS-98)			
	VII	VIII	IX	X
Colapsos	0	3 (1%)	32 (13%)	136 (53%)
Edifícios Inutilizáveis	15 (6%)	60 (23%)	114 (44%)	89 (34%)

Com o recurso à ferramenta SIG é possível elaborar cenários de probabilidade de colapso e cruzar com as informações atribuídas a cada edifício. Na figura 5.32 e figura 5.33 estão

representados as estimativas do cálculo da probabilidade de colapso de um conjunto habitacional na cidade da Horta, evidenciando a ocupação dos edifícios. Deste modo é possível avaliar os edifícios pela sua vulnerabilidade conjugada com a sua taxa de ocupação.

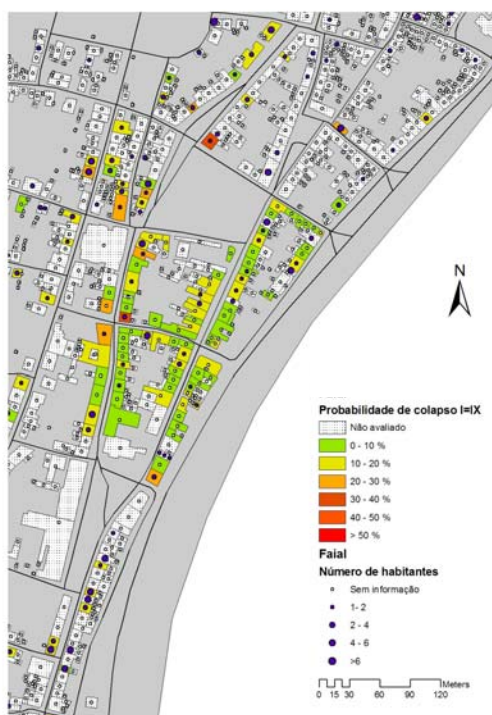


Figura 5.32 – Cenário de probabilidade de colapso para intensidade I=IX, com ocupação de edifícios.

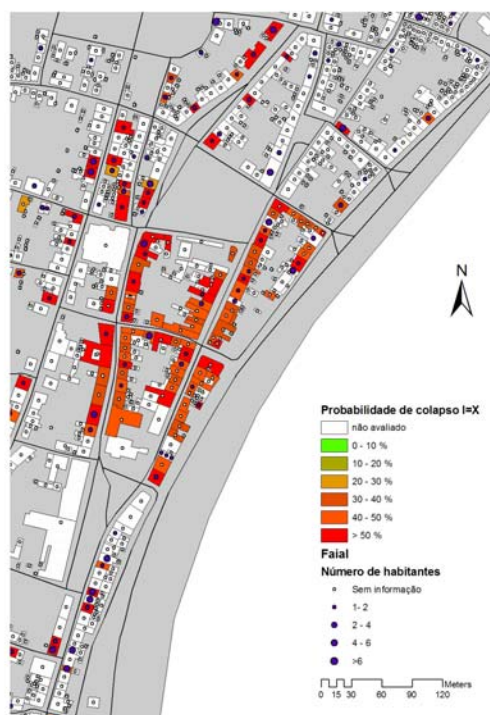


Figura 5.33 – Cenário probabilidade de colapso para intensidade I=X, com ocupação de edifícios.

Nos últimos cinco séculos foram registados cerca de 6350 perdas humanas no arquipélago dos Açores devido a eventos sísmicos [Nunes, 2008]. Visto que os eventos sísmicos são responsáveis por uma elevada taxa de perdas de vidas humanas, é importante uma gestão do risco sísmico para controlar e diminuir essas perdas.

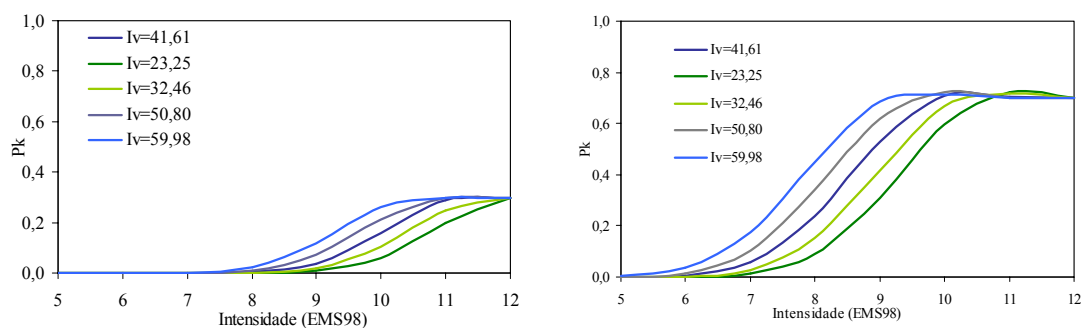
Para estimar o número de mortos/feridos graves e desalojados foi utilizada a proposta do Servizio Sismico Nazionale [Bramerini *et al.*, 1995]. Estas estimativas são calculadas com base de ocorrência de um determinado dano multiplicado por um coeficiente, como se verifica nas expressões 5.20 e 5.21.

$$P_{\text{mortos/feridos graves}} = 0,3 \times P(D_5) \quad (5.20)$$

$$P_{desalojamento} = P(D_3) \times W_{ei,3} + P(D_4) \times W_{ei,4} + 0,7 \times P(D_5) \quad (5.21)$$

Pela expressão 5.20 interpreta-se que a probabilidade de ocorrer mortes e feridos graves, surge em 30% dos residentes que habitam em edifícios com probabilidade de colapso. A expressão 5.21 exprime a probabilidade de pessoas necessitar de abrigo provisório, através da soma de 100% dos residentes de edifícios inutilizáveis com 70% dos residentes dos edifícios colapsados. Esta expressão simplista de número de mortos e feridos graves não considera a taxa de ocupação dos edifícios e a hora do evento sísmico, resultando valores subestimados em sismo que ocorram de madrugada.

Na figura 5.34 estão representadas as probabilidades de ocorrer mortos/feridos graves e desalojados para diferentes valores de  $I_v$ , ( $I_{v,médio} - 2\sigma_{iv}$ ;  $I_{v,médio} - \sigma_{iv}$ ;  $I_{v,médio}$ ;  $I_{v,médio} + \sigma_{iv}$ ;  $I_{v,médio} + 2\sigma_{iv}$ ).



(a) Probabilidade de mortos/feridos graves

(b) Probabilidade de desalojados

Figura 5.34 – Probabilidade de mortos/feridos graves e desalojados

Os valores de probabilidade de mortos/feridos graves e desalojados são calculados para sismos de moderada e elevada intensidade (VII, VIII, IX e X) sendo apresentados na, para a amostra de 260 edifícios ( $I_{v,médio}=41,63$ )

Tabela 5.8 – Resultados da estimativa de mortos/feridos graves e desalojados

	Intensidade sísmica, I(EMS-98)			
	VII	VIII	IX	X
Mortos e feridos graves	0	3 (0,3%)	29 (4%)	123 (16%)
Desalojados	44 (6%)	185 (24%)	441 (53%)	553 (71%)



## ***CAPÍTULO 6***

### **6 CONCLUSÕES**

Este capítulo aborda as conclusões gerais do trabalho, apresentando algumas das discussões finais já referidas no capítulo 3 e 4, relativamente à caracterização do parque habitacional da ilha do Faial e danos observados após o sismo de 9 de Julho de 1998. Por fim apresenta-se conclusões da avaliação da vulnerabilidade do parque habitacional da ilha do Faial.

#### **6.1 PARQUE HABITACIONAL**

Do levantamento do parque habitacional pode-se concluir que a maioria, das construções existentes na Ilha do Faial, na altura do sismo de 9 de Julho de 1998, caracterizam-se por construção tradicional. Em que as paredes exteriores, são realizadas em alvenaria de pedra e com as fachadas principais apresentando aberturas largas para janelas e portas, sendo o pavimento em estrutura de madeira, assim como a estrutura de cobertura. As paredes divisórias interiores são geralmente em tabique de madeira ou frontais.

Da análise de alguns dos resultados tratados pode-se concluir que a maioria, 57%, da construção existente na Ilha do Faial, na altura do sismo de 9 de Julho de 1998 era a construção tradicional, em que as paredes exteriores, com cerca de 66 cm, são realizadas em alvenaria de pedra e com as fachadas principais apresentando aberturas largas para janelas e portas com vergas e ombreiras e delimitados por cunhais, sendo o pavimento de soalho de madeira e com vigas de suporte também em madeira, bem assim como a estrutura de cobertura. As paredes divisórias interiores são geralmente em tabique de madeira ou frontais.

Pode-se verificar que a quase totalidade dos edifícios não apresenta cave e que só uma pequena percentagem possui meia cave, salientando-se a freguesia dos Cedros que atinge 30% dos edifícios com meia cave.

No que se refere à geometria pode concluir-se que a maioria dos edifícios apresenta a forma rectangular (cerca de 78%) sendo a forma em L a que predomina em relação à quadrada e em U, esta última com pouca expressão na maioria das freguesias. No Faial, nas freguesias que constituem a Cidade da Horta (Angústias, Matriz e Conceição) são comuns edifícios com mais de 2 pisos, chegando aos 4 pisos.

Os edifícios contíguos, representativos da existência de quarteirões (banda), são típicos de cidades, nomeadamente na cidade da Horta (freguesias de Angústias, Matriz e Conceição). Como se pode observar a maioria das freguesias rurais apresenta o “edifício isolado” como predominante, atingindo os 100% na maioria das situações.

Os tipos de pavimento mais frequentes, cerca de 60%, são constituídos por soalho e vigas de madeira.

De referir que as considerações seguintes foram obtidas da análise de um universo reduzido, podendo não ser representativa da ilha do Faial.

O tipo de cobertura mais frequente, cerca de 81%, é constituído por 2 águas de varas inclinadas designada de cobertura em “Tesoura”.

As paredes divisórias interiores mais frequentes, cerca de 34%, são realizadas em tabique. Os outros tipos de paredes são, o fasquiado de madeira, os frontais, o “platex” e o tabuado em madeira. Em construções recentes ou alteradas verifica-se que no tipo de divisória mais comum é a usado o bloco de cimento, cerca de 38%.

As paredes exteriores mais frequentes, cerca de 93%, são realizadas com 2 panos sem ligação. Em construções recentes verifica-se que o tipo de parede exterior mais comum é realizado em blocos de cimento.

## **6.2 DANOS OBSERVADOS**

Relativamente aos danos observados após o sismo de 1998 e perante uma análise de alguns dos resultados tratados, pode-se concluir que a maioria dos danos se verificaram em edifícios de construção tradicional e que a distribuição de danos, variável de freguesia para

freguesia, se restringe a uma área envolvente à zona do epicentro do sismo (Ribeirinha, Espalhafatos, Salão, Pedro Miguel, Cedros e Flamengos) aparecendo casos esporádicos mais afastados como seja o caso da freguesia de Castelo Branco.

### **6.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE**

O método aplicado foi desenvolvido com o objectivo de estabelecer cenários sísmicos baseados na avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios, no presente caso, de alvenaria de pedra. Sendo um método baseado na combinação de uma metodologia tipológica com uma tipologia convencional, apoiada na observação do dano, tratada com elementos estatísticos que a torna interessante como método de nível II. A sua aplicabilidade é reconhecida, visto que é bastante interessante para análise em grande escala. Esta metodologia identifica 14 parâmetros-chave considerando o comportamento e a resposta sísmica dos edifícios, permitindo a identificação indirecta dos pontos estruturais mais frágeis e outros problemas em edifícios. Os edifícios que apresentam elevada vulnerabilidade manifestam uma maior tendência para o dano em caso de uma actividade sísmica.

Neste trabalho é contabilizada a influência da componente vertical da acção sísmica na vulnerabilidade dos edifícios, implementado uma expressão que contribui para o desagravamento do peso próprio do edifício. Consequentemente com a diminuição do valor da resistência convencional, contribuindo para um aumento do índice de vulnerabilidade global.

Através da ferramenta SIG é possível manusear os parâmetros da base de dados, implementando uma progressiva plataforma que relaciona toda a avaliação do risco sísmico, desde características de edifícios até estimativa de perdas económicas. O cálculo da vulnerabilidade através de algoritmos (funções matemáticas e probabilísticas) é programado no software GIS. Assim, facilita a análise de todo o processo, possibilitando a edição de informação dos edifícios, cruzando as suas características e ocupação com os resultados da vulnerabilidade e estimativas de perdas, de forma rápida garantindo acções responsáveis e decisões de controlo de risco em cada edifício.

A aplicação dos estudos da vulnerabilidade por um lado indica quais os edifícios com maior tendência para o dano e por outro permite obter informações para a reorganização urbana, tomada de decisão na reconversão ou demolição de edifícios mais vulneráveis, definição de vias de comunicação de acesso a áreas mais vulneráveis, planos de salvaguarda de pessoas.



O índice de vulnerabilidade médio dos edifícios estudados é de 41,62, de acordo com a metodologia proposta. Estudos semelhantes foram realizados anteriormente para o caso da Baixa de Coimbra [Vicente, 2008], resultando num índice de vulnerabilidade cerca de 38. Comparativamente com o parque habitacional da ilha do Faial, apresenta um maior risco sísmico, considerando um hipotético cenário de igual casualidade e exposição.

Pela avaliação das perdas do parque habitacional interpreta-se que para intensidades moderadamente elevadas ( $I=7$  e  $I=8$ ) a probabilidade de inutilização de edifícios é cerca de 30 % (para  $I_v$  médios). A probabilidade de ocorrer mortes e feridos graves, é baixa contudo cerca de 30% dos residentes tem probabilidade de desalojamento.

## **6.4 TRABALHOS FUTUROS**

A avaliação da vulnerabilidade sísmica de um determinado parque habitacional está inteiramente ligada à qualidade dos dados adquiridos. Sendo necessário uma constante actualização das informações relativas às construções. Assim a base de dados associada aos estudos da vulnerabilidade, tem de permitir uma constante actualização face a novas construções ou reabilitações num determinado parque habitacional. Como trabalho futuro pretende-se obter uma base de dados actualizada do parque habitacional de forma a dar informações adequadas.

Como trabalhos futuros prevê-se a modelação computacional de edifícios representativos da construção tradicional da ilha do Faial. Os modelos serão calibrados com ensaios experimentais “in situ” já realizados [Costa *et al.*, 2008a] no parque habitacional da ilha do Faial. Estes modelos serviram de base à análise da importância da componente vertical da acção sísmica na vulnerabilidade dos edifícios de alvenaria de pedra.

Pretende-se também obter estimativas das perdas económicas em função de uma determinada intensidade sísmica, de modo a perceber o impacto económico de um evento sísmico. Estas estimativas terão como base os valores dos custos obtidos pela reconstrução do parque habitacional, descrito em [Oliveira *et al.*, 2008b], após o sismo de 1998 dos Açores.

## ***BIBLIOGRAFIA***

ArcGis (2005). Geographic Information Systems. 9.2, 9esri®. 310 New York Street, Redlands, 92373-8100, USA.

Bernardini, A.; Giovinazzi, S.; Lagomarsino, S. and Parodi, S. (2007). The vulnerability assessment of current buildings by a macroseismic approach derived from the EMS-98 scale. 3° Congresso Nacional de ingeniería sísmica, Girona.

Bramerini, F.; Pasquale, G. Di; Orsini, A.; Pugliese, A.; Romeo, R. and Sabetta, F. (1995). Rischio sismico del territorio italiano. Proposta per una metodologia e risultati preliminari."Rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale, SSN/RT/95/01, Roma.

CEN (2004). Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance – Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Standardisation, European Committee For. Brussels.

Censos (2001). Ine. Lisboa.

Centre, JRC Joint Research (2007). Field Manual for post-earthquake damage and safety assessment and short term countermeasures (AeDES). Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission, Pinto; Arthur; Taucer; Fabio.

Corsanego, A. and Petrini, V. (1990). Seismic vulnerability of buildings. Proceedings of the SEISMED 3, Trieste, Italy.

Costa, A. (2002). Determination of mechanical properties of traditional masonry walls in dwellings of Faial Island, Azores. Earthquake Engineering & Structural Dynamic. Volume 31(Issue 7).

Costa, A. A.; Costa, A.; Arêde, A.; Oliveira, C. S. and Neves, F. (2007). Caracterização experimental do sistema construtivo do grupo central do Arquipélago Açoreano - uma contribuição para avaliação e redução da sua vulnerabilidade sísmica. Sísmica 2007 - 7º Congresso de sismologia e engenharia sísmica.

Costa, A. A.; Arêde, A.; Costa, A. and Oliveira, C. S. (2008a). Estudo experimental "in situ" de paredes em alvenaria do Faial, Açores. Sismo 1998 - Açores. Uma década depois, Governo dos Açores, SPRHI, S.A.

Costa, A.; Oliveira, C. S. and Neves, F. (2008b). Caracterização do Parque Habitacional das Ilhas do Faial e Pico. Elementos de Estudo do Comportamento Relativo à Crise Sísmica de 9 de Julho de 1998 nos Açores. Sismo 1998 - Açores. Uma década depois, Governo dos Açores, SPRHI, S.A.

Costa, C. (2004). Implementação do modelo de dano em tracção e compressão com plasticidade no programa Cast3M, Laboratório ELSA.

Costa, R. M. (2008). Uma breve perspectiva da história da ilha do Faial. Sismo 1998 – Açores. Uma década depois, Governo dos Açores, SPRHI, S.A.

CT115 (2008). Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios., NP EN 1998-1.

GECORPA and SPES (2001). Redução da vulnerabilidade sísmica do edificado.

Giovinazzi, S. and Lagomarsino, S. (2003). Seismic Risk Analysis: a Method for the Vulnerability Assessment of Built-up areas. European Safety & Reliability Conference, Maastricht.

GNDT-ING-SSN (1998). Criteri di calcolo per la progettazione degli interventi.

GNDT-SSN (1994). Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo livello e secondo livello (muratura e cemento armato). Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.

Grunthal, G. (1998). European Macroseismic Scale. Séismologie, Cahiers Du Centre Européen De Géodynamique Et De Luxembourg. Volume 15.

Guedes, J. H. C. and Oliveira, C. S. (1992). Caracterização da Edificação de Alvenaria Tradicional. Elementos para o Estudo do Comportamento do Parque Habitacional aquando do Sismo de 1 /1/80 nos Açores”, SRHOP/LNEC.

Hazus (1999). Earthquake Loss Estimation Methodology - Technical and User Manuals. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Klir, G. J. and Yuan, B. (1995). Theory and Applications Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Upper Saddle River NJ Prentice Hall.

LessLoss (2007). European Research Project for Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides. Website: [Http://www.Lessloss.Org/Main/Index.Php](http://www.Lessloss.Org/Main/Index.Php).

LREC (2006). Proposta de caracterização geológica e geotécnica dos perfis estratigráficos dos Açores.

Lamas, B (2003). Manual de Restauro e Recuperação/Guia do Construtor, Zona antiga da Cidade da Horta. Edição da Câmara Municipal da Horta.

Neves, N. M. (2004). Identificação Dinâmica e análise do comportamento Sísmico de um quarteirão localizado na cidade da Horta – Ilha do Faial. Tese de mestrado em engenharia Civil Porto, FEUP.

Nunes, J. C.; Guedes, J. H. C.; Oliveira, C. S. and Forjaz, V. H. (2001). Classificação geotécnica dos solos vulcânicos dos Açores: uma proposta. Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica (Ed.), Actas do II Simpósio de Meteorologia e Geofísica – Comunicações de Geofísica. Évora.

Nunes, J. C. (2008). Caracterização sumária da sismicidade da Regiões dos Açores. Sismo 1998 – Açores. Uma década depois, Governo dos Açores, SPRHI, S.A.

Oliveira, C.S.; Costa, A. and Nunes, J.C. (2008a). Sismo 1998 Açores, uma década depois, Governo dos Açores, SPRHI, S.A.

Oliveira, C. S.; Costa, A. and Neves, F. (2008b). O processo da reconstrução do parque habitacional nas ilhas do Faial, Pico e São Jorge na sequência da crise sísmica de 9 de Julho de 1998 nos Açores. Análise de alguns dados. Sismo 1998 - Açores. Uma década depois, Governo dos Açores, SPRHI, S.A.

Project, RISK-UE (2004). An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities, Website: <http://www.risk-ue.net>.

Paupério, E.; Romão, X.; Guedes, J. M. and Costa, A. (2008). Emergency plans and heritage preservation International seminar on Seismic Risk and Rehabilitation, Faial, Azores.

RSA (1983). Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Aprovado pelo Decreto-lei n.º235/83, de 31 de Maio.

Sotto-Mayor, Maria Luísa Raposo de Magalhães do Nascimento e Sousa (2006). Risco sísmico em Portugal continental. Engenharia do Território. Lisboa, IST. Tese de doutoramento.

Vicente, R.; Varum, H.; Mendes da Silva, J. A. R.; Lagomarsino, S. and Parodi, S. (2007). Metodologia da avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios antigos à escala do centro histórico. SÍSMICA 2007 - 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, Porto, Portugal.

Vicente, R. (2008). Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana, Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Engenharia Civil. Aveiro, Universidade de Aveiro.